ISBN 986026355-8
9789860263558
GPN：1009904632
定價：300元

特刊第一五〇號
農業工程與節能減碳學術研討論文集
行政院農業委員會農業試驗所

農業試驗所特刊第 150 號

農業工程與節能減碳學術研討會專刊

Proceedings of the Symposium on Agricultural Engineering and Technologies for Saving Energy and Reducing Carbon Emission

Oct. 27, 2010

Published by Taiwan Agricultural Research Institute
Taichung, Taiwan, ROC

Edited by L. D. Huarng, W. H. Hsu and J. R. Tsay

行政院農業委員會農業試驗所

黃禮棟、徐武煥、蔡致榮 主編

中華民國九十九年十二月

農業試驗所 115 週年所慶系列活動之一：「農業工程與節能減碳」學術研討會

2010.10.27 攝於農試所科技服務大樓

『農業工程與節能減碳學術研討會』專刊序文

以往森林的大肆砍伐、化石燃料的大量使用及永續經營理念的嚴重缺乏，使得大氣中二氧化碳等溫室氣體的濃度急速上升，也造成愈來愈明顯的全球氣候變遷，更導致嚴重乾旱、狂風暴雨頻繁及其他氣象異常等現象。民國 98 年莫拉克颱風及今(99)年凡那比颱風所造成的災害，使得國內農林漁牧損失慘重，國人生命、財產也遭受重大威脅。國際上 1997 年京都議定書的簽定係為規範溫室氣體減量排放管制的工作，也是國際社會減緩暖化現象的重要共識與作為。

本所自 1895 年成立以來，從事農業試驗研究工作，對台灣農業生產實有長遠與具體的貢獻，而且隨著時代的變遷與社會的脈動常有因應的調整作為，今年適逢本所創立 115 周年，為喚起國人重視節能減碳及農業永續經營之理念，並加強彙集相關單位研發的行動能量，冀望減緩全球環境暖化對水資源、農作物、自然生態系統及人類生活環境等所造成日益嚴重的衝擊，特邀請專家學者深入探討農業工程技術在節能減碳議題之可能發展與應用，分享予與會的嘉賓與大眾。

本次研討會內容範圍寬廣而且豐碩，包括農業節能生產、節水技術、節能設施、人工光源與熱泵技術、再生能源以及區域農業節能減碳施行構思等，相信能讓大家對農業生產節能操作有更深一層理解，也期望藉由本研討會的商討以及產官學研的交流，為國內農業節能減碳農業工程的研發與應用開創新局。

行政院農業委員會農業試驗所 謹識

中華民國九十九年十月廿七日

主席致詞

中華農機學會陳理事長、台灣生機學會林理事長、宜蘭大學吳副校長、台灣大學周主任、盧教授、在場各位先進及本所同仁，大家早！由於陳所長今天在農委會臨時有重要會議必須出席，因此由我代替所長、代表本所，在此向各位表示歡迎。

大家都知道全球氣候變遷，所導致的氣候異常現象，已經顯而易見。從前年的辛樂克、去年的莫拉克、今年的凡那比及剛離開的梅姬颱風，台灣已連續三年遭遇颱風嚴重侵襲，不只是豪雨，而且是超大豪雨，每次都造成國內農林漁牧損失慘重，國人生命、財產也遭受重大威脅。

農委會有鑑於氣候變遷將對農業產生重大衝擊，今(99)年 6 月 15 日召開「因應氣候變遷農業調適政策會議」，針對農業之資源與生態、產業發展、防災救災及節能減碳等議題進行跨領域研討；隨後在記者會上，宣布七項因應氣候變遷農業調適之關鍵策略，這裡面包含整合科技提升產業抗逆境能力、推動低碳農業、開創低耗能與低碳排的綠金新商機等，希望我國農業能朝向「低風險、低碳排、新商機」發展。

農業試驗所面對因應氣候變遷課題，應有的具體行動，責無旁貸。為能貢獻一份心意，喚起國人重視節能減碳及農業永續經營的理念，特於本所 115 週年所慶之際，辦理本次研討會，非常感謝大家熱情參與、共襄盛舉。看到今天爆滿的場景，就知道這個會議很重要，也是一個未來極具潛力及前瞻的發展議題。

本次研討會特別邀請國內知名的學者專家擔任講座，深入探討農業工程技術在節能減碳議題的可能發展及應用，與大家分享，內容範圍相當寬廣且豐富；而在研討會最後的綜合座談中，並安排與會專家與大家進行產官學研交流與商討，希望各位一定要留到最後一刻。相信透過今天的研討會，能讓大家對農業生產節能操作有更一層理解，也為國內節能減碳農業工程的研發與應用開創新局。

最後，預祝研討會圓滿成功！各位貴賓身體健康、萬事如意。謝謝大家。

來賓致詞

中華農業機械學會陳理事長世銘：

呂副所長、林理事長、蔡主任秘書、各位主管、各位農機與生機同仁大家好。今天的研討會是一個非常重要而且有意義的研討會，因為過去我們不管在農機或作物方面，都花了不少的努力在農業的研究發展上，而才有今天大家有目共睹的具體成果。但就如剛剛呂副所長所提的氣候變遷對我們所造成的衝擊，在這樣一個大環境變遷之下，我們要如何去評估及應對，節能或減碳技術將是很重要的議題，這必需要大家持續的努力與再一次的合作，才能讓我們的研究能夠迎接這個挑戰，並繼續將成果應用於農業之實務面。

節能方面，傳統的觀念認為農業生產體系能夠節省多少能量，那就算是節能，但事實上更深入的想法，應該再考量其所得到的產出，譬如以植物工廠為例，可能用的電比傳統設施更多，但是並不代表它這樣不節能，因為它的產出若能比以前更多，這就有可能合算。所以要看產品之每單位產量的耗能有多少，減碳量有多少才對。這固然是一個挑戰，但將也是一個機會，當我們面對有限資源時，如何去面對選擇與應對，使有最佳的結果，是我們必須深思的課題。能源之使用，與人類文明及生活水準息息相關，我們不可能再回到以前沒有電燈、電視、網路的時代，換句話說，必要的能源支出是勢所難免的，所以在節能的科技與對策上，我們必須持續努力與突破。

我非常感謝農試所在 115 年所慶，舉辦這個有意義的研討會，提出農業工程與節能減碳這個重要的議題來共同研討，腦力激盪。很高興看到非常多的農機、生機界同仁，還有其他相關領域的同仁出席這場研討會，我覺得這是非常好的場合，讓大家能集思廣益，來看問題在那裡？瓶頸在哪裡？突破點在那裡？怎樣去面對，怎樣去找到可行的答案。最後謹代表農機學會敬祝各位身體健康，大會圓滿成功，謝謝大家。

臺灣生物機電學會林理事長達德：

呂副所長、陳理事長、蔡主任秘書、各位先進、各位女士、先生大家早安、大家好。很高興有這個機會代表臺灣生機學會來祝賀今天研討會的舉行圓滿成功。今天的研討會是以節能減碳為主題，而節能減碳主要還是源自二十一世紀幾個影響全球發展議題裡的二個重要的議題，一個能源短缺的問題，另一個是

全球氣候變遷的問題。今天的研討會中有各方面的專家針對我們的節電、節能、節水，還有如何應用新興科技於二十一世紀裡問題的解決。事實上，可能很多人著眼這個全球環境變遷與能源短缺議題，它是一個環境或能源問題的解決，但另一方面更積極的面向則是因為有這些問題亟待解決，則有些新興的產業與科技會因應時代的趨勢而加速發展，所以從另外一個角度來看也是一個新契機。這一兩年來不管全世界或台灣對於節能減碳議題的認知與目標愈來愈明顯，農業工程的重要性因應節能減碳議題，也在這一兩年內更加突顯。新興科技譬如無線感測網路、植物工廠、節能技術、生質能源這些領域，都會變成在這個世紀解決全球環境變遷與能源短缺的問題的重要科技，甚至整合發展成新興產業。

今天我們齊聚於此，一起來研討有關節能減碳的議題，我剛才看了今天的議程非常豐富，從產業面、技術發展面到區域性節能減碳之需求，都做了非常好的涵蓋。於慶祝農試所 115 週年所慶的這個機會裡，我們辦這個有意義的研討會，它非常具有實質的意義，讓大家能夠對於新的問題、新的技術的整合，還有整個新興產業的發展，有更多新的創意、新的共識能夠在今天的研討會產生。以上謹簡短地藉這個機會分享一點個人看法，同時預祝我們研討會順利成功，並敬祝各位嘉賓身體健康，萬事如意。

議　程

時間：99年10月27日(週三)

地點：行政院農委會農業試驗所科技服務大樓3F國際會議廳

時間	議程	主持人	演講人
09:00~09:30	報到		
09:30~09:40	開幕式	陳所長駿季	
09:40~09:50	長官暨來賓致詞	農委會科技處 葉處長瑩 中華農機學會 陳理事長世銘 台灣生機學會 林理事長達德	
09:50~10:30	專題演講：農業工程與農業節能生產	宜蘭大學 吳副校長柏青	台灣大學生機系 盧福明教授
10:30~10:50	茶敘		
10:50~11:30	專題報告一：農業動力用電現況與節能減碳措施	台灣大學生機系 周主任瑞仁	農糧署資材組 翁組長震炘
11:30~12:10	專題報告二：農業生產節水技術與系統研發		嘉義大學生機系 艾群教授
12:10~13:10	午餐時間		
13:10~13:50	專題報告三：農業設施節能技術與系統研發	屏東科大生機系 蔡主任循恒	農業試驗所 蔡主任秘書致榮
13:50~14:30	專題報告四：低耗能人工光源與高效能熱泵技術在農業之應用研發		台灣大學生機系 方煒教授
14:30~15:10	專題報告五：再生能源技術之應用研發	嘉義大學生機系 黃主任慶祥	中興大學生機系 盛中德教授
15:10~15:30	茶敘		
15:30~15:55	區域研發需求一：以區域農業發展看節能減碳之工程研發-台中場	中興大學生機系 萬主任一怒	台中區農業改良場　張場長致盛
15:55~16:20	區域研發需求二：以區域農業發展看節能減碳之工程研發-台南場		台南區農業改良場　王場長仕賢
16:20~16:50	綜合座談	陳所長駿季	專題演講人及各專題報告人與談
16:50	散會		

目　錄

農業工程與節能減碳學術研討會專刊序文 I

主席致詞 II

來賓致詞 III

議　程 V

目　錄 VI

農業工程與農業節能生產 1

一、 前　言 1
二、 農業生產與能源應用 2
三、 節能耕作生產方式 6
四、 農業機械節能方式 7
五、 農業生產節能方法 9
六、 結　語 10

農業動力用電現況與節能減碳措施 12

一、 前　言 12
二、 近年來農業動力用電增加檢討分析 13
三、 農業動力用電登記類別及用電量檢討分析 14
四、 節能減碳輔導措施 15
五、 結　語 16

農業生產節水技術與系統研發 21

一、 引　言 21
二、 技術回顧與目前現況 24
三、 台灣的農業用水與節水技術 32
四、 結　語 36

農業設施節能技術與系統研發 38

一、 引　言 38
二、 溫室節能的基本與荷蘭經驗 39

三、 溫室節能技術回顧與目前現況 43
四、 世界節能政策趨勢 56
五、 溫室節能措施 62
六、 國內展望 65
七、 結　語 66

低耗能人工光源與高效能熱泵技術在農業之應用研發 70
一、 低耗能人工光源在農業的應用與研發 70
二、 高效能熱泵技術在農業的應用與研發 71
三、 低耗能人工光源與高效能熱泵技術在農業的整合應用 73
四、 氮源、碳源與能源系統之整合 75
五、 結　論 76

再生能源技術之應用研發 77
一、 引　言 77
二、 技術回顧與目前現況 78
三、 未來世界趨勢與國內展望 86
四、 結　語 88

以區域農業發展看節能減碳之工程研發-台中場 90
一、 前　言 90
二、 節能減碳研發現況與成果 91
三、 未來產業需求與研發展望 98
四、 結　語 100

以區域農業發展看節能減碳之工程研發-台南場 102
一、 前　言 102
二、 台南場設施環控節能與資源再生相關研究 103
三、 未來節能減碳之工程研發方向 106
四、 結論與建議 113

綜合座談 114

農業工程與農業節能生產

盧福明

國立台灣大學生物產業機電工程學系教授

摘　要

農業生產作業過程如能節省能源消耗量即有減碳效果。目前農業生產依賴石油產品之比重高，提高農業生產效益方式之一為在節省能源消耗量原則下追求高產量、高品質及高經濟價值農產品。選用能源種類及能源應用技術皆會影響農業生產效益。在節能減碳政策及油源日漸枯竭之大環境之下，行政院農業委會己於 2010 年 6 月提出農業節能減碳因應政策。本文僅就農業工程與農業節能生產面向探討因應措施。農業生產除了改善及提升現在使用傳統能源之效率之外，勢必積極研發或推廣採用最合適之節能方式和尋找其他替代能源。台灣農機在節能方面仍存有寬廣改善空間，可透過改變操作方或裝設節能輔助設備達到節能效果。

關鍵詞：節能、減碳、農業、農業機械

一、前　言

台灣農業發展重點以稻作為主逐漸擴及其他雜糧、蔬果和畜產等領域。台灣農業機械化之發展亦配合稻作之需求而邁出第一步。台灣農業機械化之發展歷程約可分為四個階段。在初始起步階段(1950 ~1970 年)由政府引進耕耘機推廣使用及大力輔導設立耕耘機製造廠商之後，即進入第二階段的農機發展時期(1971~1980 年)。在第二階段，政府制定推動加速農業機械化方案並成立各地代耕中心，農業機械在稻作生產之使用由示範點擴散到各個鄉鎮。第三階段(1981~1990 年)全面推動農業機械化，包括園藝、畜牧、雜糧和漁業生產機械和加工處理機具。第四階段(1991 年至今)推動農業自動化和農業電子化及資訊化作業。在現有農業發展要確保生產、生活、生態的平衡政策和節能減碳目標之下，下一階段的農業機械發展將走向節能減碳導向之農業機械化。

為因應全球油源日益枯竭及油價高漲趨勢，農業追求節能生產技術，提高使用石化能源效率和探討利用替代能源之可行性。降低石化能源消耗量可以減少二氧化碳排放量，降低大氣温室效應而減緩地球暖化現象。大氣的成分包含78%的氮氣、21%的氧氣、稀有氣體包括 0.93%的氬氣、0.04%的二氧化碳及其

他氣體(包括氖氣、氦氣、甲烷、氪氣、氫氣) 。稀有氣體含量雖低，但對溫室效應與地球暖化的影響頗大，產生溫室效應的氣體包括水氣、二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、臭氧和六氟化硫。除了溫室氣體之外，大氣中也漂浮一些懸浮微粒例如粉塵、有機粒子、硫酸鹽粒子和火山灰。粉塵來源包括土壤犁耕作業和車輛行駛泥地所產生之土壤微粒、燃燒化石燃料與生質材料或使用噴霧劑。

二氧化碳為產生溫室效應的主力，於 2000 年，溫室氣體之 70%皆因人類活動所衍生出的二氧化碳，人類每年產生的二氧化碳量高達 250 億噸，其中由使用石油而產生的二氧化碳量達 101 億噸(Parkinson, 2010; Energy Information Administration, 2010)。在 200 年前工業革命時，大氣中二氧化碳濃度約 280ppm，到 2008 年其濃度已達 386ppm，相當於每年增加 0.5ppm。在 2000 年到 2008 年之間，大氣中二氧化碳濃度的增加率約為每年 2.1ppm，較 200 年來的平均增加率高出 4 倍。政府的政策訂定在 2020 年將溫室氣體排放量降到 2008 年水準。過去 30 年來，因為溫室氣體效應所導致之地球表面平均氣溫增加率約為每 10 年增加 0.18℃，臺灣平地平均氣溫上升 0.12℃。海平面高度每年平均約升高 0.17 公分。溫室效應所產生的地球暖化現象導致作物提早開花及影響動物交配時期等副作用及增加蒸發現象增加缺水危機及土壤塩一化程度而不利於農作物之生產。地球暖化亦有其有利的一面，例如減緩冬天暖氣之消耗及動植物凍死或霜害之程度。

為因應溫室效應影響農業生產之程度，世界各國已擬定各項因應措施及研究解決方案。台灣在這方面的研究起步不晚，成果豐碩，在政策方面也多有因應措施。為加強宣導及執行節能減碳政策，行政院農業委員會在 2010 年 6 月召開「因應氣候變遷農業調適政策會議」檢討過去及策劃未來在農業方面之節能減碳措施(農委會, 2010)。農業生產作業過程如能節省能源消耗量即有減碳效果。本文僅就農業工程與農業節能生產面向探討因應措施並以農業機械化角度提出構想，拋磚引玉就教於農業先進。

二、 農業生產與能源應用

農業生產過程中所需之原料生產或作業例如種子、肥料、水資源、犁耕、栽培管理和收穫加工處理等大都仰賴石化油能源。地球能源消耗量及成本日增，每一美元可購置能源量由 1995 年之 2,354 千卡降為 2005 年之 2,026 千卡，10 年間之降幅約 14%，如表 1 所示。產油國家每一美元可購置能源量居高，換言之，其能源較便宜，因此在工業化且自有油源之國家的農產品生產成本較低。

近年來使用能源導致大氣碳排量加速增加、溫室氣體效應造成地球暖化現象愈形嚴重，世人不得不面對事實提出對策，節能減碳運動成為各行各業永續

發展策略。農業愈現代化的國家其生產機具及設施亦多，因之石油消耗量亦高。亞洲國家在 1980 到 2006 年之 26 年間，每年消耗石油所排放之二氧化碳量如圖 1 所示。台灣在 1995 年之後每年消耗石油所排放之二氧化碳量增加不多，約維

表1. 單位美元購置能源量(Wenger等, 2009)

地區/國家	1995 年 (千卡/美元)	1995 年 指數(%)	2005 年 (千卡/美元)	2005 年 指數(%)
全球	2,354	82	2,026	88
美國	2,863	100	2,298	100
中南美洲	1,653	58	1,713	75
歐洲	2,046	71	1,810	79
前蘇聯	5,239	183	3,702	161
中東	3,568	125	3,792	165
非洲	1,756	61	1,605	70
中國	2,462	86	1,994	87
印度	1,315	46	1,009	44

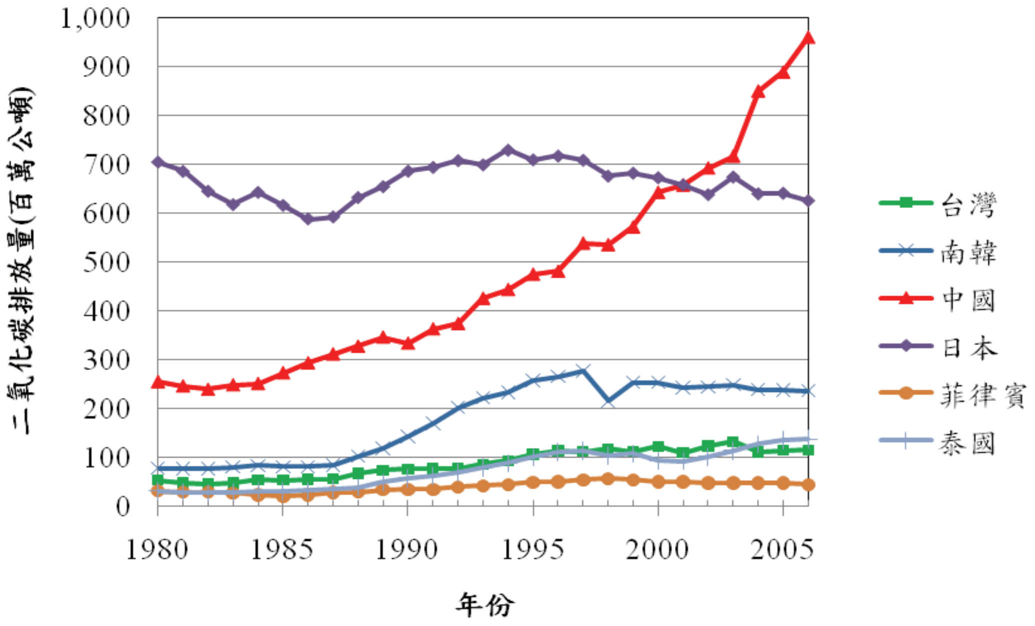


圖 1. 亞洲國家每年消耗石油所排放之二氧化碳量(Energy Information Administration, 2010)

持在 110 百萬公噸左右(台灣於 2005 年之全部二氧化碳排放量為 276 百萬公噸，其中農業生產佔 0.44%)。反之中國則加速升高二氧化碳排放量，於 2006 時達到 970 百萬公噸左右。泰國和菲律賓二氧化碳排放量與台灣之差異不大。工業大國例如美國於 1985 年至 2000 年間每年消耗石油所排放之二氧化碳量約由 2000 百萬公噸增加到 2,500 百萬公噸左右，每年排放之二氧化碳量約為台灣 23 倍。雖然農業生產之碳排量遠低於其他產業，例如日本農林水產業之二氧化碳排放量約只佔全國之 1.0% (其中農林業佔 64%，約 8,865 千噸)，農業生產仍須注重節能減碳(日本農林水產省, 2008)。

目前農業生產依賴石油產品之比重高，提高農業生產效益方式之一為在節省能源消耗量原則下追求高產量、高品質及高經濟價值農產品。選用能源種類及能源應用技術皆會影響農業生產效益。各式能源及技術之優劣勢比較如表 2 所示。田間農業生產耕作機具及設施生產的能源以石油為主，近年來則有少部份改用生質燃料。在節能減碳政策及油源日漸枯竭之大環境之下，農業生產除了改善及提升現在使用傳統能源之效率之外，勢必積極研發或推廣採用最合適之節能方式和尋找其他替代能源，例如太陽能、風能、生質能、燃料電池和天然氣等。農業生產必須隨著評估能源應用之結果做出正確調適才能達到永續經營的效果。

行政院農業委會提出擴大農業節能減碳方案指出海洋、土壤、森林生態系具強大碳吸附能力，換言之，農業生產之碳吸存量大於排放量，具有減緩全球暖化的現象。農委會提出之因應措施要點如下(農委會, 2010)。

1. 發展節能減碳新技術及設施：開發低耗能與節能農漁機具與設施，運用太陽能等多元再生能源，推動農業節能環控生產模式；改善畜牧業經營與廢水循環利用，降低溫室氣體排放。
2. 推行「農產品碳足跡」制度：發展低碳農業，鼓勵消費低碳農產品，並建立農業碳排放量盤查制度。推廣合理化施肥、低投入之栽培模式，研發稻桿等在地農業廢棄資材再利用。
3. 強化農業碳匯功能：發動全國造林與加強護林，充分利用公私有地，鼓勵公民營機關團體參與，適度提高山坡地獎勵金；並推展海洋植藻、農田保育耕犁，研發增加森林、海洋及土壤碳匯之技術。

上述三要點所列之事項有些部份己在國內推動，但仍有大部份尚待落實。其中與農業工程包括農機直接相關聯者諸如低耗能與節能農機具、節能環控生產模式、廢水循環利用、農業廢棄資材再利用、農田保育耕犁、造林與護林和土壤碳匯等項目。為達到上述節能目標可由材料、設計和操作管理三方面來推

表2. 各式能源及技術之優劣勢(Wenger等, 2009)

能源及技術	優勢	劣勢
增加效率	新能源具方便性、使用費用低	投資大、省能源效率高反而可能增加能源使用量
石油	較其他能源便宜、技術普及且使用方便、採用固碳技術可防止環境污染	油源枯竭、產生溫室氣體效應、石油生產國易有專制及腐敗現象
天然氣	產量豐富、環境衝擊較石油小、可以液態方式行銷全球	生產國多為專制國家、產生溫室氣體、鑽探及運輸投資大、天然氣輸送管線維護不易
煤	產煤國家蘊藏量豐富且便宜	採礦危險度及污染性高、產生多量溫室氣體
生質燃料	可再生且具有地域性能源特點、第二代生質燃料能量高於第一代	利用玉米為生質能源會增加糧食價格、土地使用面積增大加速環境衝擊、未達經濟使用效益
地熱	可再生、發電便宜	必須配合高效率管理制度、當作居家熱源之使用成本高
核能	低價且不產生溫室氣體	設置成本高、有輻射廢料處理及外洩問題、冷卻用水會加熱河水或海水溫度
太陽能	供給充裕、不會產生溫室氣體	較一般傳統發電貴、夜間無法作業、必須增加日光收集效率和能源儲存方式、太陽能板之生產過程會產生有毒廢棄物
風能	油價每桶超過美金 40 元時風力發電才具有優勢	風機影響景觀、對野生動物具有危險性、佔用農地
重油、頁岩油與焦油砂	產地侷限於美國、加拿大、澳洲、巴西、中國、委內瑞拉與蘇俄，具有擴大儲油量的優勢	生產方式較石油貴約 10 倍、生產過程耗能又耗水、產生高量溫室氣體、環境衝擊大
海浪	能源量大於風能 900 倍	採集能量之經費過高
藻類	可轉換為生質柴油或噴射燃料油、較生質能源作物生長快速且占地小、可設置於任何地點、可解決環境汙染問題	生產成本高(1 加侖美金 20 元)、多年後才可商業運轉
燃料電池(結合氫與氧產生電力)	可管控二氧化碳之排放、可應用於汽車與住家、效率高於一般電池	成本特別昂貴

動節能減碳措施。例如改良品種(耐熱、耐旱及耐塩)、研發新栽培方式(播種期、肥培、灌溉、輪作)、調整施肥方式(淺層或深層、條施或散施) 、應用新材料加強改善農機減重設計、提升農機保養維修效率和改善田間耕犁方式(不整地耕耘、深耕)等。

三、 節能耕作生產方式

不同耕作方式之能源需求確有改善空間。Borin 等(1997)比較一般犁耕方式、畦溝犁耕方式和不整地耕耘方式等不同耕作方法在栽培玉米、黃豆與大麥所需能量和碳平衡的研究中指出，畦溝犁耕方式和不整地耕耘方式較傳統犁耕方式節省能源量分別為 10%和 32%，二氧化碳排放量分別減少 1190 m^3/ha/year 與 1553 m^3/ha/year，如表 3 所示。

不整地耕耘方式係不用犁具翻土而將種子直接植入土壤中的耕作方式，具有減少土壤過度細碎流失、有機碳流失的效果及涵養水分和抑制雜草的作用。不整地耕耘作業方式讓田間殘留作物在土壤中分解腐爛，土壤表面或土壤內的有機質之分解緩慢而限制二氧化碳的排放量，大部分碳成分可貯存於土壤內。自然界中，動物吸氧排二氧化碳，但植物吸二氧化碳排氧。植物吸收二氧化碳行使光合作用轉換為有機質，促進植物成長。原本貯存在作物內的碳成分會在收穫及食用之階段轉換成二氧化碳釋放到大氣中，也有部分碳成分會轉換為有機質貯存於土壤內。因之農民耕作方式會影響作物內的碳成分的轉換方式。

犁耕時土壤表面有機質混入內層並與空氣混合之後可加速微生物反應，促使有機質快速分解釋放二氧化碳而增加大氣中二氧化碳含量。雖然農民必須費時及增加投資之後才可有效執行不整地耕耘作業模式，在美國和歐洲皆認為在旱地將傳統犁耕作業轉換為不整地耕耘或最小耕作農業型態具有顯著的土壤固碳作用(Van Oost 等, 2004)。雖然不整地耕耘或最小耕作(保育耕作)方法被肯定具

表3. 不同耕作方式單位面積及單位產量(玉米、黃豆與大麥)所需能源消耗量之比較(Borin等, 1997)

耕作方式	單位面積所需能源 (MJ/ha)	單位產量所需能源 (MJ/ton)
一般犁耕方式	6,546	1,206
畦溝犁耕方式	3,676	748
不整地耕耘方式	2,541	618

有省能及增加土壤固碳效果，但亦有人對其固碳效果的顯著性提出保守觀點 (Van Oost 等, 2004; Charles 等, 2010)。

Lal (2004) 提出增加土壤固碳的方針包括土壤改良、地面造林、不整地耕耘作業、覆蓋作物、營養管控、施用固態與液態堆肥、改善放牧方式、開闢及保護水資源、有效灌溉及農業造林、在空地栽植能源作物。減少二氧化碳量排放之效果，例如土壤每固定一噸碳約可增加小麥產量 20~40 kg/ha，玉米 10~20 kg/ha，豇豆 0.5~1 kg/ha。全世界可耕地增加土壤固碳量一公噸，即可抵銷每年全球石化油所產生的二氧化碳量 4~12 億噸或相當於 5~15%全球石化油氣體排放量。

Lal 等(2004) 深入探討不整地耕耘方式的固碳效果指出不妥善的農耕方式在美國造成土壤固碳量減少 40±10 億噸，在全世界的土壤固碳量約減少 780±120 億噸。土壤固碳減少的量大部分多排到大氣中。土壤含碳量的損失主要來自犁耕時翻轉土壤所造成的風化作用和水力侵蝕作用。收穫後將植株殘梗放置田間會增加土壤含碳量並減少土壤流失，但植株殘梗等生質材料若被犁耕入土壤內，則會因為微生物的作用而快速分解為二氧化碳排入大氣中。農業永續經營可採用省能之不整地耕耘方式配合作物覆蓋和輪作方式以增加土壤有機碳含量。

全球可耕地約 1,379 百萬公頃，其中僅有 5%採用不整地耕耘方式。殘留植株置於田間雖有利於土壤固碳作用，但可能減少飼料來源及生質燃料原料，且有可能導致病蟲害的發生。在不顯著減少產量和影響品質之原則之下，如能改良台灣水稻或其他作物的傳統栽培作業方式或減少作業層次即可達到節能生產之效益，例如水稻直播、無畦或淺畦栽培、田區選擇性除草及施肥等。

四、 農業機械節能方式

日本農林水產省(2008)提出日本稻米生產過程二氧化碳排放量如表 4 所示。每公頃二氧化碳排放量為 796.1 kg/公頃，其中以育苗、犁耕、水田整平、乾燥、插秧、收穫等作業較高，其中以乾燥作業佔 47%為最高，此可解讀為乾燥作業耗能最多。因此在耗能較大的農作業仍具有較大節能空間。謝(2003)調查台灣農機耗油量的平均值結果為：動力插秧機 268c.c./ps-h、中耕管理機 259 c.c./ps-h、動力割草機 412 c.c./ps-h、動力噴霧機 530c.c./-h、農地搬運車 233c.c./ps-h。其調查之多台同型機的個別耗油量之差距廣，顯示各型農機之操作仍存有節能省油之空間。

表4. 日本稻米生產過程二氧化碳排效量(日本農林水產省, 2008)

	二氧化碳排放量 (kg/公頃)	比例(%)
育苗	81	10.2
土壤改良	8.5	1.1
犁耕	95.2	12.0
水田整平	88.1	11.1
插秧	65.6	8.2
施肥	4.8	0.6
病蟲害防治	4.2	0.5
除草	2.4	0.3
收穫	67.7	8.5
乾燥	373.9	47.0
碾米加工	4.7	0.6
合計	796.1	100.0

在節能機械的推展工作上，日本農林水產省提出之發展措施包括採用低燃料費型之農業機械(省能源機構、高燃燒效率機構等)、低電力型農業機械、生產工程省力型農業機械、高效率型農業機械(高速化、寬度大等)、代替燃料對應型農業機械。後藤等(2010)研究曳引機上之省能指示裝置以協助操作者達到省油節能的效果。該裝置可提醒操作人員適當操控曳引機，例如控制排檔、引擎轉速、動力傳動軸(PTO)轉速和行走速度等來減少油耗量。其實驗採用 24 馬力曳引機在稻田(12 公頃)及旱田(大豆及小麥田 8 公頃)之作業結果，指出有設置省能裝置者較傳統方式用油量(160.8 公升/公頃)節省油料量為 18.4 公升/公頃，相當於減少 11.4%耗油量，二氧化碳排放量減少 452 公斤/年。

日本農林水產省(2009)指出農業機械節能方針為正確與妥善的保養或改善機構形式與作業方式。各機構包括引擎、動力傳動部、行走部、作業部、空調、乾燥機燃燒爐等。例如乾燥機採用遠紅外線乾燥方式可使其燃料消費量比一般熱風乾燥方式減少 3~10%，電力消耗量減少 5~30%；曳引機在田間之作業速度提高 20~30%時，單位面積的燃料消耗量可減少 15%。田間長距離移動大型聯合收穫機應採用貨車搬運，而非直接駕駛農機到另一地點，例如 30 馬力 3 行式和 40 馬力 4 行式收穫機最高速度約 7.5 km/hr 及 9.5 km/hr，其耗油量為 1.5~2 公里/公升，但中小型卡車耗油量為 5~6 公里/公升。台灣農機在節能方面仍存有寬廣改善空間，可透過改變操作方或裝設節能輔助設備達到節能效果。

五、 農業生產節能方法

IPCC (政府間氣候變遷委員會 Intergovermental Panel on Climate Change)係由世界氣象組織(WMO)和聯合國環境計畫(UNEP)於 1988 年成立的機構，該委員會在第四次的報告中(IPCC, 2007)指出過去 100 年來世界平均氣溫上升 0.74℃，但過去 50 年來氣溫的上升速率為 100 年來的 2 倍，此表示近年來地球暖化有加速的現象。若大氣平均溫度增加 2~3℃則穀物生產量在低緯度國家會減少，但在中高緯度國家則會增加，因此溫室效應造成地球暖化的結果，對開發中國家的影響最大。高溫的害處例如稻株高熱損傷(例如在成熟期溫度超過 27℃會產生白粉質粒米及胴裂米)、果實著色異常及增加病蟲害發生機率。精準施肥和調整栽植密度可減少稻米白粉質粒米，延後播種及避免過早排水和妥善的收穫方式可減少稻米胴裂(MAFF, 2007)。

在探討穩定世界糧食危機的報告中(Charles 等, 2010；Fedoroff 等, 2010)提出的方案具有節能減碳概念，其方案包括：

1. 有效結合生產鏈：作物生產過程從種子、水源、肥料、蟲害防治、土壤及地域性與耕作技術等環節都必須有妥善配合，才可確保作物產量與品質。
2. 提升產量限度：改善現有的農作方式，盡力提高產量，方法包括耕作方式的改變和種植具有耐逆境之基因轉殖作物。
3. 減少廢棄物：改善收穫後處理方式，減少農作物在田間收穫及加工貯藏過程中產生的新鮮廢棄物或儲藏損耗。
4. 改變飲食習慣：減少肉食，增加素食習慣以減少畜產業所消耗的能源及排出的廢棄物量。
5. 擴展整合農業與養殖漁業系統。

Charles 等(2010)也指出減低溫室氣體排放的方式包括改變農耕作業方式、採用病蟲害綜合防治方法、採用畜牧廢棄物綜合處理方式、推廣農業造林。在農業生產方面，建議採用不整地耕耘方式或少耕制度及採用精準農業。精準農業作業方式係依據田間作物及土壤差異性分別施用合理的農藥及肥料量，以降低農業資材施用量。

配合農業生產之農機節能措施可採取選用下列幾種機具或作業模式即具減少能源浪費和提升作業效率之優勢，諸如加強舊農機整修、少量精準噴藥、高精度施肥、高精度中耕除草、糙米乾燥、粗糠爐乾燥稻米、遠紅外綫乾燥機取代熱風乾燥、油電混合動力機、廢棄能源回收再利用、太陽能動力取代農業機械少部分動力、合理化施肥方式和不整地耕耘播種方式等。另外在石油能源之外亦可採用電力、水力和風力。例如採用下列設備：

1. 電動機械：在小型割草機、噴霧機、剪枝機或大型機械上之低動力機構(例如插秧機插植機構)上配置小型電動馬達取代汽油引擎。陳令錫等(2008)曾研發全電力驅動的噴霧機具，採用四只電動車專用電瓶 6V 225AH 供應 DC24V 電力，在電瓶充飽電力下之作業時間約為 6 hrs。2010 年 10 月在雲林縣虎尾鎮之全國農機展中已有國產小型電動割草機和噴霧機參展。
2. 田間電氣化：設置架空電纜(臨時性及移動性設施提供農機具動力來源，可應用於電動曳引機、電動插秧機和露天型育苗場機械設備等田間農機具之動力源)。
3. 水力機械：在水位落差大地點裝置引水管路到加工場、直接利用水位落差動力或利用水力發電。
4. 風力機械：導引自然風力進行穀倉通風降溫、畜舍通風降溫換氣、或於養殖漁塭裝設風力水車進行曝氣作業改善水質。

六、結　語

農業節能減碳生產方式並非回歸到工業革命前以人畜力為主之農耕作業方式，而是要善用自然能源，減少應用多加工層次的能源並提升現有能源使用效率。配合國內節能減碳重點政策，在農業方面可改善努力之空間包括品種改良、研發新型栽培方式、調整灌溉及施肥方式等面向。農業工程基本上包括環境、水利和機械等領域，在節能減碳方面各有其發揮的空間。農作物栽培過程可採用節水型灌溉方式與適量施肥方式。在農機方面除了可改善農機設計與操作方式減低能源消耗之外，也可採用替代性能源作為動力源。另外在農耕方面採用不整地耕耘方式，除了可節省能源消耗之外，也具有增加土壤固碳的效果，減少溫室氣體的排放。

因應國際農機發展趨勢及節能減碳目標，在農機領域可採行之對策，在省力化方面包括生產及使用高效率及經濟型農業機械，例如在移植機、管理機、收穫機、曳引機和植物工場設施加入自動化控制導引、智慧型感應、機器人化作業系統以達到省力化效果(比傳統機械節省一半人力)。在節能減碳方面可採用低燃料費用之農業機械 (回收能源、節能機構與材料、高効率機具等) 、低電力型電動農業機械、多重功能型農業機械、高效率型農業機械 (高速化、作業寬幅化等) 和替代性燃料(生質能源)農業機械。國內在農業機械的研究與推廣方面，未來除了鼓勵節能機械的開發研究之外，也應檢討改善慣行犁耕方式以達到節能和增加土壤固碳能力的效果。在農業節能生產之管理層面應有配套措施來落實節能技術，例如訂定或推動獎勵制度、節能標準、產品節能標章和教育推廣。

參考文獻

1. 日本農林水產省。2008。農業機械の省エネ性能を巡る情勢について。農林水產省生產局生產技術課編印。
2. 日本農林水產省。2009。農業機械の省ネ利用マニュアル。農林水產省生產局編印。
3. 後藤隆志、手島司。2010。トラクタ用省エネ運轉指示裝置の效果。農業機械學會誌 72(5)：500-508。
4. 陳令錫、田雲生、張旭志、何榮祥。2008。電動自走鼓風噴霧機之開發。臺中區農業改良場研究彙報 99:51-59。
5. 農委會。2010。因應氣候變遷農業調適政策會議總報告。行政院農業委員會。
6. 謝華偉。2003。台灣主要汽油類農業機械耗油量、使用年限與更新壽命之探討。國立屏東科技大學碩士論文。
7. http://www.coa.gov.tw/show_hot_news.php?id=coa_webuser1_20100617163826
8. Borin, M., C. Menini, and L. Sartori. 1997. Effect of tillage systems on energy and carbon balance in north-eastern Italy. Soil & Tillage Research 40: 209-226.
9. Charles, H. et al. 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science 327: 812-818.
10. Energy Information Administration. 2010. International Energy Annual Report 2006. http://www.eia.doe.gov/emeu/iea/Notes%20for%20Table%20 H_1co2.html
11. Fedoroff, N. V. et al. 2010. Radically rethinking agriculture for the 21st century. Science 327:833-834.
12. IPCC. 2007. http://www.ipcc.ch/
13. Lal, R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science 304: 1623-1627.
14. Lal, R., M. Griffin, J. Apt, L. Lave, and M. G. Morgan. 2004. Managing soil carbon. Science 304: 393.
15. MAFF. 2007. Impact of global warming on agriculture, forestry and fisheries and possible countermeasures in Japan. Report on research and development in agriculture, forestry and fisheries No. 23(2007). Agriculture, Forestry and Fisheries Council, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries, JAPAN.
16. Parkinson, C. L. 2010. Coming climate crisis? Consider the past, beware the big fix. Roman & Littlefield Publishers, Inc., New York.
17. Van Oost, L., G. Govers, T. A. Quien, and G. Heckrath. 2004. Comment on “Managing soil carbon” (I). Science 305: 1567.
18. Wenger, A., R. W. Orttung, and J. Perovic. 2009. Energy and the transformation of international relations: toward a new producer-consumer framework. Oxford University Press.

農業動力用電現況與節能減碳措施

翁震炘

行政院農業委員會農糧署農業資材組 組長

摘　要

農業動力用電優惠包括基本電費減免及流動電費補貼等二項。依農業發展條例規定，農業動力用電費用，不採累進計算，停用期間免收基本費。農業動力用電停用期間按每月用電負載率計算減免基本電費，目前減收之基本電費由台電公司自行吸收，98 年農業動力用電減收電費由台電吸收 2 億 6,681 萬餘元。

國內電價於 97 年 7 月 1 日及 10 月 1 日起分二階段調漲，共計調漲 25.2%，漲幅約 0.6 元，農委會依 97 年 5 月行政院會議通過「當前物價穩定方案」，辦理流動電費補貼，補貼電價漲幅之二分之一，平均每度補貼 0.3058 元，由台電公司直接於電費單扣除，再向農委會請領補貼款，依台灣電力公司統計 97 年 7 至 12 月份農業動力用電補貼金額合計為 8,910 萬餘元，98 年全年補貼為 2 億 9,092 萬餘元，實質嘉惠農民。

「當前物價穩定方案」實施期限至 97 年 12 月底止，為減輕農業動力用電成本負擔，98 年度行政院同意農委會續辦用電補貼一年，99 年度行政院審議結果，「當前物價穩定方案」係具期限性措施，隨能源逐漸耗竭，發電成本短期恐難調降，為避免降低節約用電誘因及其他行業援引比照要求政府補貼，應回歸市場機制，不宜照案長期補貼。為因應高價能源及節能減碳趨勢，並促進農業永續經營，農委會已研擬農林漁牧節能減碳之產業調適策略及輔導配套措施，鼓勵農民及農企業使用高效節能之農業生產機具(如電照菊、蘭花環控栽培及農產品冷藏用電等)，並協助合理用電(如善用離峰用電及電費折扣獎勵節能等方式)，以提升節能減碳成效，減輕農民用電成本負擔。

一、前　言

(一)依「農業動力用電範圍及標準」第 2 條規定農業動力用電，以直接供農業生產所需動力用電者為限，包括農業灌溉及水利設施操作用電、農作物栽培及收穫後處理用電、農產品冷藏及糧食倉儲用電、水產養殖用電、畜牧用電等五類。

(二)目前農業動力用電優惠包括基本電費減免及流動電費補貼等二項。

1. 基本電費減免：

(1) 依農業發展條例第 29 條第 2 項規定：「農業動力用電費用，不採累進計算，停用期間免收基本費」。

(2) 另依「農業動力用電範圍及標準」第 4 條規定，農業動力用電停用期間按每月用電負載率計算減免基本電費。目前減收之基本電費由台電公司自行吸收，98 年農業動力用電減收電費由台電吸收 2 億 6,681 萬餘元。

2. 流動電費補貼：

(1) 國內電價於 97 年 7 月 1 日及 10 月 1 日起分二階段調漲，共計調漲 25.2%，漲幅約 0.6 元，農委會依 97 年 5 月行政院會議通過「當前物價穩定方案」，辦理補貼電價漲幅之二分之一，平均每度補貼 0.3058 元。由台電公司直接於電費單扣除，再向農委會請領補貼款，並於電費單內註明政府補貼金額，以宣導政府政策。

(2) 依台灣電力公司統計 97 年 7 至 12 月份農業動力用電補貼金額合計為 8,910 萬餘元，98 年全年補貼為 2 億 9,092 萬餘元，實質嘉惠農民。

(3) 99 年 1 至 10 月份台電公司估計需補貼金額約 2.5 億元。

二、 近年來農業動力用電增加檢討分析

(一)98 年農業動力用電戶數 35,395 戶，總用電量 9.51 億度，平均每戶每月用電量 2,240 度，全年用電補貼額度為 2 億 9,092 萬餘元，各類用電資料(如表 1)：

1. 畜牧用電，平均每戶每月用電量 4,308 度，用電量 268 百萬度，佔 28.2%。
2. 農產品冷藏及糧食倉儲用電，平均每戶每月用電量 32,704 度，用電量 104 百萬度，佔 11.0 %。
3. 水產養殖用電，平均每戶每月用電量 2,025 度，用電量 266 百萬度，佔 27.9 %。
4. 農業灌溉及水利設施操作用電，平均每戶每月用電量 673 度，用電量 119 百萬度，佔 12.5 %。
5. 農作物栽培及收穫後處理用電，平均每戶每月用電量 3,777 度，用電量 194 百萬度，佔 20.4 %。

(二)近 5 年(94 至 98 年)農業動力用電戶數在 34,870 至 35,416 戶，以 98 年與 97 年比較分析，總用電戶數減少 121 戶，畜牧用電等 5 類別互有消長，其中水產養殖用電戶增加 346 戶最多，農業灌溉及水利設施操作用電戶減少 306 戶(如表 2)。

(三)用電量部分，近 5 年(94 至 98 年)用電量在 7.67 至 9.51 億度，以 98 年與 97 年比較分析，總用電量增加 1.3 億度，成長 15.8%，各類別用電量皆有成長，其中水產養殖用電增加 0.62 億度，成長 30.0%(如表 3)。

(四)98 年受補貼用戶總用電量相較 97 年成長 15.8%，經分析原因如下：

1. 新增農戶為農企業經營，用電量較大，造成用電成長，如台南縣蘭花科技園區同期間新增農戶 10 戶，所增加契約容量約 3474.5 千瓦，佔該項契約容量約 5.7%。
2. 國內農業總產值逐年增加，故用電量成長應與所投入農業生產自動化及農業相關設施契約容量增加，從而使農業產值提高有關。
3. 98 年受補貼用戶契約容量相較前一年同期契約容量成長 2.13%。
4. 98 年水產養殖用電戶增加，台電公司加強查緝各類用電，導正用電戶實際用電情形，導致農業用電量增加。

(五)現行台電公司電費計價方式：

1. 時間電價：包括尖峰時間為 3.22 元，半尖峰時間為 2.26 元，離峰時間為 1.52 元。(儲冷式空調冷凍系統，其離峰用電再打 6 折)。
2. 非時間電價：按實用度不分日夜時間差異而計收，流動電費每度為 2.50 元。
3. 據台電公司統計，目前農業動力用電戶使用「離峰用電」者約 3%(1,143 戶)，多數用電戶並未享受省電費措施，需加強輔導業者申請，降低用電成本，因此，用電戶使用離峰用電者，給予相當之獎勵，應可提高誘因。

三、 農業動力用電登記類別及用電量檢討分析

(一)依台電公司統計 98 年農業動力用電戶數 35,395 戶，總用電量 9.51 億度，1 萬度以上用電戶占 3%，用電量占 45%(如表 4)。

(二)99 年 7 月份(用電高峰)農業動力用電，1 萬度以上用電戶登記類別及用電分析：

1. 用電戶部分：個人登記 1,092 戶、畜牧場 177 戶、農民團體 163 戶、政府及公營機關(台糖) 67 戶 、農企業(公司行號登記)112 戶。合計 1,611 戶。(如表 5)

2. 用電量部分：個人登記佔 52%、畜牧場佔 9.6%、農民團體佔 23.6%、政府及公營機關(台糖) 佔 4.1%、 農企業(公司行號登記)佔 10.7%。(如表 6)

(三)99 年 7 月份 5 千度以上用電戶登記類別及用電分析：

1. 用電戶部分：個人登記 2,924 戶、畜牧場 341 戶、農民團體 238 戶、政府及公營機關(台糖) 101 戶、農企業(公司行號登記) 1361 戶。合計 3,740 戶。(如表 7)
2. 用電量部分：個人登記佔 59%、畜牧場佔 9.2%、農民團體佔 19.4%、政府及公營機關(台糖)佔 3.6%、 農企業(公司行號登記)佔 8.8%。(如表 8)
3. 5 千度以上用電戶，其中政府及公營機關計 101 戶，包括台糖公司 61 戶、退輔會農場 11 戶、縣政府 13 戶、農委會試驗改良場 13 戶、學校 2 戶、省自來水公司 1 戶。

(四)政府機關及公營機關用電戶，已有編列足額用電經費預算，不應由農委會再予以補貼，應以身作則，養成節約用電習慣，降低用電支出。

(五)公司行號登記之農企業大用電戶，為專業性商業化公司企業，既為從事商業營利，自應負擔用電成本，由農委會再予補貼並不合理。

(六)每月用電 3 千度以下之小農戶，達 30,532 戶佔 86%，大部分為從事農業耕種抽水灌溉、水產養殖打氣、飼養家畜禽給水給飼、通風保溫、冰存牛奶，或菊花照明等日常生產作業或維生所需用電，其節能空間有限。

(七)每月用電 1 萬度以上用戶 1,139 戶佔 3%，用電量佔 45%，多為農企業、冷凍倉儲業，節電空間大，配合改善意願高，需加強輔導節能設施，減少用電。

四、 節能減碳輔導措施

(一)大用電戶節能設施輔導：

1. 由農委會與經濟部能源局及台電公司協助成立跨部會「節能技術服務團」，輔導大用電戶改善老舊設備或設置再生能源設施，以提升節能減碳成效，根本節省用電支出。透過節能技術服務團，診斷各類別農業用電耗能情形，協助業者改善設施，及使用高效節能之農業設施及作業方式，降低用電成本。
2. 輔導節能設施：

(1) 冷房設施：搭配離峰用電、設置儲冷式空調系統，可節能 20-30%以上。

(2) 冷凍設施：更新老舊壓縮機及冷媒，可提高節能效率 20-30%以上。

(3) 照明設施：改用 T5 燈管、省電燈泡或 LED 燈，最大可節能 50%以上。

(4) 供電設施：更新老舊電線、變壓器、馬達等，可節能 20%以上。

3. 由業者就節能設施，提出改善計畫，由「節能技術服務團」審核後，給予設施補助，補助方式農委會正研擬具體補貼獎勵辦法，如按月由流動電費予以補貼折抵等。

4. 依台電公司統計每月用電 5 千度以上政府及公營機關計 101 戶，其中農委會所屬試驗改良場所計 13 戶，將由農委會節能減碳推動小組透過綠能基金會進行節電輔導，減輕用電成本負擔。

5. 輔導業者使用離峰用電，依台電公司統計目前使用離峰用電計有 1,143 戶已申裝使用，將持續鼓勵使用，以提升節能減碳成效，減輕農民用電成本負擔。

(二)為防止農戶分電表套領補貼，以 99 年 9 月為基期年，同一供電線路，分電表者擇一電表補貼，由台電公司按申裝電表時間查核管制。

五、結　語

能源係耗竭性資源，電價恐難調降，因此，應透過政策性補貼及輔導措施，針對用電量較大農業生產，透過研發節能技術及設施，根本節省用電支出，另應加強宣導用電戶使用離峰用電，引導改變用電習性，降低電費支出及生產成本，推廣農業設施替代能源，如稻穀乾燥使用粗糠燃料，推廣節能農業生產作業，如菊花栽培以短時、間歇光照，節省用電，並以省電燈炮代替傳統白熱燈炮，推廣溫室儲冷式空調系統等等，透過節能技術服務團，診斷各類別農業用電耗能情形，協助業者改善設施，使用高效節能之農業設施及作業方式，降低用電成本。

表1. 98年農業動力用電一覽表

類　別	用戶數 (戶)	用電量 (百萬度)	各類用電量比率 (%)	平均每戶每月用電量 (度)	平均每戶每月用電費 (元)	補貼金額 (萬元)
畜牧用電	5,187	268	28.2	4,308	10,604	8,201
農產品冷藏及糧食倉儲用電	266	104	11.0	32,704	75,203	3,192
水產養殖用電	10,941	266	27.9	2,025	4,456	8,129
農業灌溉及水利設施操作用電	14,719	119	12.5	673	1,735	3,634
農作物栽培及收穫後處理用電	4,282	194	20.4	3,777	8,809	5,935
合　計	35,395	951	100.0	2,240	5,284	29,092

表2. 94至98年農業動力用電戶數比較表

類　別	用戶數(戶)				
	94 年	95 年	96 年	97 年	98 年
畜牧用電	5,275	5,207	5,107	5,182	5,187(+5)
農產品冷藏及糧食倉儲用電	258	268	268	269	266(-3)
水產養殖用電	9,825	10,035	10,222	10,595	10,941(+346)
農業灌溉及水利設施操作用電	14,729	14,828	14,752	15,025	14,719(-306)
農作物栽培及收穫後處理用電	5,022	4,527	4,521	4,445	4,282(-163)
合　計	35,109	34,865	34,870	35,516	35,395(-121)

表3. 94至98年農業動力用電量比較表

類　　別	用電量(億度)				
	94 年	95 年	96 年	97 年	98 年
畜牧用電	2.39	2. 53	2.43	2.43	2.68
農產品冷藏及糧食倉儲用電	0.82	0.84	0.96	1.00	1.04
水產養殖用電	1.98	2.01	1.92	2.04	2.66
農業灌溉及水利設施操作用電	1.02	1.10	1.02	1.06	1.19
農作物栽培及收穫後處理用電	1.45	1.59	1.65	1.70	1.94
合計 (與前一年比較)	7.67	8.08(+5.3%)	7.97(-1%)	8.21(+3%)	9.51(+15.8%)

表4. 98年農業動力用電平均每月用電量(度)及戶數表

類　　別		平均每月用電量(度)及戶數						
		1 千以下	1 至 2 千	2 至 3 千	3 至 5 千	5 千至 1 萬	1 萬以上	合計
畜牧用電		2,254	852	505	574	551	451	5,187
農產品冷藏及糧食倉儲用電		93	22	12	22	25	92	266
水產養殖用電		6,220	1,783	999	979	717	243	10,941
農業灌溉及水利設施操作用電		12,930	675	362	347	255	150	14,719
農作物栽培及收穫後處理用電		3,314	364	147	123	131	203	4,282
合　　計		24,811	3,696	2,025	2,045	1,679	1,139	35,395
百分比	用戶數	70%	10%	6%	6%	5%	3%	100%
	用電量	16%	7%	6%	10%	16%	45%	100%

表5. 99年7月份農業動力用電1萬度以上戶數分佈表

登記類別	個人登記	畜牧場	農民團體	政府及公營機關(台糖)	農企業(公司行號)	合計(戶數)	百分比(%)
畜牧用電	452	177	2	29	32	692	42.9
農產品冷藏及糧食倉儲用電	8	0	101	1	3	113	7.0
水產養殖用電	343	0	2	8	17	370	23.0
農業灌溉及水利設施操作用電	38	0	31	12	9	90	5.6
農作物栽培及收穫後處理用電	251	0	27	17	51	346	21.5
合計(戶數)	1,092	177	163	67	112	1,611	100%

表6. 99年7月份農業動力用電1萬度以上用電量分佈表

類　　別	個人登記	畜牧場	農民團體	政府及公營機關(台糖)	農企業(公司行號)	合計(千度)	百分比(%)
畜牧用電	9,412	5,429	102	626	1,579	17,148	30.3
農產品冷藏及糧食倉儲用電	202	0	10,528	16	97	10,843	19.1
水產養殖用電	5,962	0	296	351	653	7,262	12.8
農業灌溉及水利設施操作用電	608	0	1,025	317	172	2,122	3.7
農作物栽培及收穫後處理用電	13,288	0	1,437	1,023	3,575	19,323	34.1
合計(千度)	29,472	5,429	13,388	2,333	6,075	56,698	100%
百分比(%)	52.0	9.6	23.6	4.1	10.7	100%	

表7. 99年7月份農業動力用電5千度以上戶數分佈表

登記類別	個人登記	畜牧場	農民團體	政府及公營機關(台糖)	農企業(公司行號)	合計(戶數)	百分比(%)
畜牧用電	999	341	2	39	34	1,415	37.9
農產品冷藏及糧食倉儲用電	16	0	123	1	3	143	3.8
水產養殖用電	1,370	0	2	10	25	1,407	37.6
農業灌溉及水利設施操作用電	152	0	74	32	12	270	7.2
農作物栽培及收穫後處理用電	387	0	37	19	62	505	13.5
合計(戶數)	2,924	341	238	101	136	3,740	100%

表8. 99年7月份農業動力用電5千度以上用電量分佈表

登記類別	畜牧場	個人登記	農民團體	政府及公營機關(台糖)	農企業(公司行號)	合計(千度)	百分比(%)
畜牧用電	6,589	13,277	102	709	1,590	22,267	31.1
農產品冷藏及糧食倉儲用電	0	262	10,688	16	97	11,063	15.5
水產養殖用電	0	12,960	296	368	713	14,337	20.1
農業灌溉及水利設施操作用電	0	1,362	1,302	463	196	3,323	4.6
農作物栽培及收穫後處理用電	0	14,291	1,509	1,038	3,656	20,494	28.7
合計(千度)	6,589	42,152	13,897	2,594	6,252	71,484	100%
百分比(%)	9.2	59.0	19.4	3.6	8.8	100%	

農業生產節水技術與系統研發

艾 群

國立嘉義大學生物機電工程學系教授

摘　要

由於全球暖化造成氣候變遷，台灣受限於天然地理條件，存在降雨的時空分布不均、豐枯水期之雨量懸殊、河流短促蓄水率差等問題，即將顯現缺水問題。而農業用水又是總用水量之四分之三，因此如何節省農業用水，是解決台灣水資源的方法之一。本文最主要是針對農業用水中最大宗的灌溉用水技術問題討論，探討以色列與美國加州農業節水技術，建議台灣未來在農業節水方面可以努力的方向。

一、引　言

全球自 1906 到 2005 年上升攝氏 0.74 度；且 20 世紀下半葉的上升幅度是平均值的 2 倍，人類有 90%的可能性是造成暖化的元凶，海面上升，1961 到 2009 年，海面每年上升 1.8 公釐；1993 到 2009 年加速為每年 3.1 公釐，而專家預計在 2100 年時將比 1990 年高出 38 公分至 56 公分。海平面上升的主要原因是海水體積膨脹，格陵蘭及南極洲冰川溶化的影響較小。自 1970 年代起，乾旱範圍擴大、持續更久且情形更嚴重；南北美東部、北歐、北亞、中亞降雨「大幅」增加，但非洲南部、南亞部分地區降雨減少。台灣受限於天然地理條件，自古即存在「降雨的時空分布不均」、「豐枯水期之雨量懸殊」、「河流短促蓄水率差」等問題。氣候變 遷的趨勢下，上述問題勢必更加嚴峻，尤其對「看天吃飯」的農業來說，更是一大挑戰。

臺灣氣候分析與預測，年雨量並無顯著變化，但降雨時數明顯減少，尤其是小雨（每小時累積雨量低於 5 毫米）次數大幅減少，導致平均降雨強度增加 20%。南部雨季變短乾季卻拉長。各地全年下雨天數都減少，降雨日 20 世紀初減少 31 天、到 20 世紀末已減少 98 天，連續不下雨天數逐漸變長，尤其南部雨季越來越短，乾季逐漸變長。台灣夜間空氣相對濕度也有下降趨勢，全年相對濕度超過 90%的發生時數，從 500 小時降到 200 小時，尤其都會區高濕度發生機率更明顯減少。濕度及霧的減少對植物衝擊相當嚴重，尤其是乾旱季節（如南台灣冬、春季），但國內目前對此沒有任何評估。

所謂農業用水，其內涵包括灌溉用水、養殖用水及畜牧用水等三項。早期之農業用水係以水稻灌溉為主，惟現在由於農業生產結構大幅改變，旱作栽培、養殖漁業及畜牧業快速成長，在用水量方面亦佔有相當之比率，故不能以水稻灌溉用水即代表整個農業用水。由水利署統計 97 年水資源供給概況，年總供水量 180 億 m^3，地面水 121 億 m^3，地下水 58 億 m^3。每年水資源需求概況為年計畫利用總水量 180 億 m^3，農業用水量 130 億 m^3，生活用水量 34 億 m^3，工業用水量 16 億 m^3， 97 年水資源概況為全島年降雨量 1,089 億 m^3，年蒸發 253.68 億 m^3，年逕流量 784.82 億 m^3，年滲透量 50.50 億 m^3 (水利署統計資料,2010)。農業用水佔總用水量 71%，而灌溉用水又約佔農業用水之 70%，水田佔可耕地 52%，稻米產值為農作物總產值之 21%，台灣地區民國 88 至 97 年平均水資源利用結構可見圖 1。

臺灣四面環海，氣候溫暖潮溼，年平均降雨量約 2,467 公釐，雖為世界平均值 973 公釐的 2.6 倍，但因地狹人稠，每人每年可分配雨量僅約 4,074 噸，不及世界平均值 21,796 噸的五分之一，顯示臺灣為水資源匱乏地區（圖 2）。此外，德國 Kassel 大學環境系統研究中心依據 1961～1995 年全球水文數據，

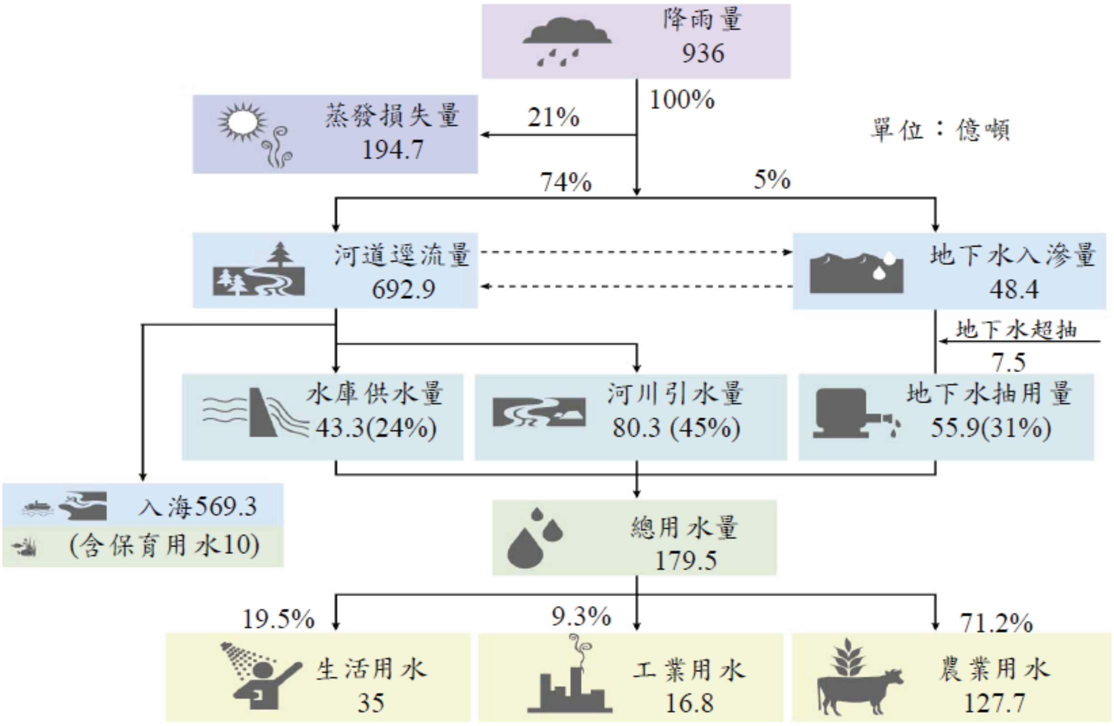


圖1. 台灣地區民國**88**至**97**年平均水資源利用結構(水利署統計資料, 2010)

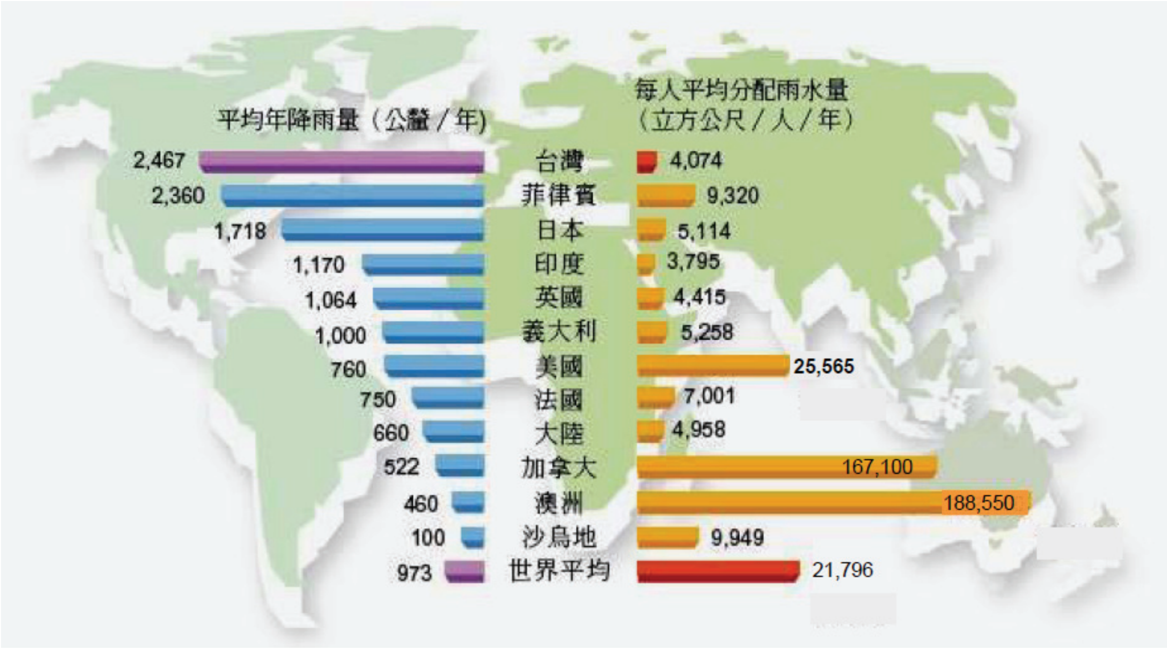


圖2. 各國降雨量及每人分配雨量比較(水利署統計資料, 2010)

所作之統計顯示，台灣為世界第 19 位缺水國家，因此枯旱時的缺水情況可能成為常態。且因地狹人稠，每人每年所分配雨量僅及世界平均值之七分之一，且雨量在時間及空間上之分佈極不均勻，五月至十月之雨量即佔全年之 78%，枯水期長達六個月，再加上河川坡陡流急、腹地狹隘，逕流量被攔蓄利用的僅有 177.54 億立方公尺，約佔年總逕流量之 18%，其餘均奔流入海。台灣目前現有大小水庫約 40 座，密度相當高，為庫容均不大，水庫總容量約 22.43 億立方公尺，有效容量為 20.51 億立方公尺。因此如何蓄水貯水增加可使用水量為一大課題。

台灣地形狹長，東西最寬處不過 150 公里，而標高 1,000 公尺以上的山區即占 32%，100~1,000 公尺的坡地也達 31%，使得河川皆坡陡流急，降雨後迅速逕流入海，甚難蓄存，雖已闢建多座水庫，惟總容量有限，不易穩定供水。台灣年總用水量約 180 億噸，由水庫供水量約 43 億噸，目前水庫有效容量僅 19 億噸，佔全年用水量的 11%，遠低於鄰國日本水庫 36%（圖 3），若氣象水文情況不佳，即顯現缺水危機。

在台灣如此缺水的狀況下，農業用水約佔總用水量 71%，且灌溉用水又約佔了農業用水的 70%左右，因此如何節約農業用水就成了解決台灣缺水問題的一大方案了。

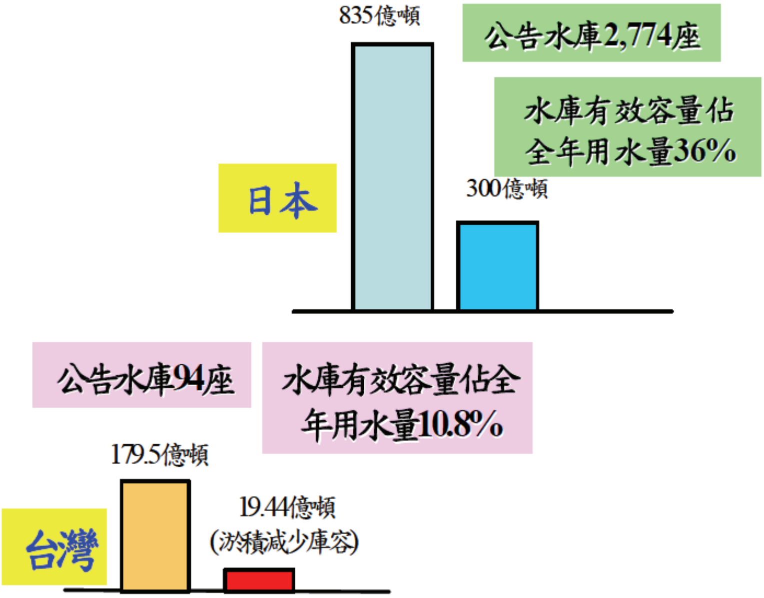


圖3. 台灣及日本水庫運用概況(水利署統計資料, 2010)

二、 技術回顧與目前現況

水是農業的基本，農業是人類定居、生產文化的[開始。人類知道使用水，用水來「灌溉」作物，或自高處築「塘」蓄水，以「渠道」輸水至低處，用「溝」將過剩的積水排走，用「井」去補充缺雨時期的灌溉水等技術，無論在東、西方都是一個生產的必需技術。

隨著時代的變遷，這些技術會進步。例如傳統的水淹灌溉，可以改進為溝灌、滴灌、噴灌與地下管路灌溉。傳統的水塘蓄水可以加深成「埤」或是擴大成「水庫」。傳統的渠道也可由較小的「水陂」改成大條的輸水「幹線」，而且聯結攔水堰、沉砂池、分水門、渡槽、虹吸管，到輸水的分、支線形成一個完整的供水網脈。傳統的排水溝也可以配合「暗管」、「暗渠」、「排水門」、「攔潮閘」與「堤防」等形成一個完整的排水系統。傳統的水井，也可以挖得更深，鑿得更大，改用金屬井管，使用抽水馬達以增加揚程與抽水量。

目前，台灣地區總耕地面積約有 87 萬公頃，其中有灌溉設施，屬農田水利會灌溉轄區內之農地約有 37 萬公頃，其餘 50 萬公頃之農地幾乎均無可靠之灌溉水源，在此一用水困難情形下，如何節省農業用水、提高水資源利用效率及解決乾旱時期作物灌溉問題，同時達到灌溉自動化目標，則成為政府有關部門長期努力之目的。

台灣地區作物向來以水稻為主，米為主要糧食作物，農田灌溉也以水田為主要對象，旱作物除甘蔗、蔬菜及少數特種作物外，少有灌溉。近十餘年來，由於國人飲食習慣改變，國內稻米消費量逐年減少，自民國 65 年起即發生生產過剩現象，與此同時，隨著國人消費型態及生活習慣的改變，國內對花卉、蔬菜、水果及雜糧之需求量卻相對增加，農業經營內容與型態隨之轉變，乃趨向精緻化、設施化、自動化、技術化及企業化，旱作栽培漸受重視，旱作管路灌溉方式的採用也逐漸普遍。

許多學者從不同學科和角度對節水農業的定義進行了闡述，但是對農業節水內涵的理解卻是基本一致的。農業節水是指充分利用自然降水和高效利用灌溉水的農業。在農業生產過程中的全面節水，既包括灌溉農業，又包括旱作農業；既包括工程節水，又包括農藝節水和管理節水。農業節水的核心是在有限的水資源條件下，採用先進的工程技術、適宜的農業技術和用水管理之政策與技術等綜合措施，充分提高農業水的利用效率和生產效益。農業節水的目的是在使農業供水量不變甚至減少的情況下，逐步擴大灌溉面積，增加農作物產量，提高經濟效益 ，促進農民增收，最終實現農業持續穩定發展。(董克宝，2007)

目前農業用水灌溉技術如下：

1) 低壓管道輸水灌溉技術：低壓管道輸水灌溉技術，是利用低壓輸水管道代替輸水渠，將水送到田間的技術措施。低壓管道輸水灌溉具有省水、節能、省地、省工、省時、便於管理、投資較低等優點，與噴、微灌相比，田間水利用率較低。為減少輸、配水過程水量的損失，現新建灌區都實行管道化輸水。

2) 噴灌技術：噴灌是利用一套專門設備，使水產生一定壓力，然後將壓力水射到空中，形成細小水滴，降落到地面濕潤土壤的灌水方式。噴灌具有灌水均勻、用水少、適應性強、省地、省工、增產、增效的特點。但投資高，耗能大，其噴灑效果受風影響大。

3) 微灌技術:微灌是通過管道系統與潛水器，按作物的需水要求，將水輸送到根部土層表面或土層的灌水方法。類型有滴灌、微噴灌和淹灌等。微灌具有省水、省工、增產、增效、投資低及便於和其他農業措施相結合的優點。

4) 改進地面灌水技術：傳統灌水方法定額大，均勻度差，田間水利用低，因此，需要改進地面灌水技術，改進地面溝規格，採用先進的灌水技術。

5) 精準灌溉節水技術：為了充分利用灌至作物根系活動層內的水分所採用的農業措施，稱為為農業綜合節水技術。在工程節水技術的基礎上，發展綜合農業節水技術，達到節水、高產、高效是當前研究的一個重點。我國注重綜合節水技術的研究已久，以期達到節水、優質、低耗的目標。

6) 雨水彙集利用技術：台灣降雨量每年約900億噸水，然而可使用大約只有20億噸水，雨水彙集利用技術，是在乾旱半乾旱丘陵地區，將較大強度降水所產生地表徑流彙集起來，並在最需要的時候供給作物利用的技術。這是一項古老而具有潛力的技術。我國對雨水彙集利用源遠流長，取得許多成功的經驗。但雨水的引導彙集、儲存和高效利用上缺乏系統化研究，可以結合生態與休閒觀光來設計雨水彙集的設施。

7) 節水灌溉管理技術：是根據作物的需水規律控制、調配水源，最大限度滿足作物對水的需求，實現區域效益最佳的農田水分調控管理技術。這項技術包括土壤商情監測、高效灌溉制度的制訂、綜合效益最佳等灌區配水技術。節水高效灌溉管理制度是灌溉管理技術的基礎，它是根據作物的需水規律，把有限水量在作物生育期內進行最優分配，達到高產高效的目的。我國對主要作物需水量和需水規律，已正進行系統研究，但對非充分灌溉還缺乏系統研究，滿足不了節水農業快速發展的需要。（劉學珍，2009）

對於有關農業節水，此處先舉國外為例參考，在這方面，以色列的經驗值得借鑒。以色列 60 ％的土地年均降水量只有 300 公釐，一些地方不足 150 公釐。在這樣不利的環境中，以色列憑藉發達的水利灌溉系統，農業高度發達，農產品產量驚人，大量出口。以色列 60％以上的國土處乾旱與半乾旱狀態，水資源嚴重匱乏。但由於長期致力於發展水技術特別是農業節水技術，最大限度地利用水資源，自建國以來，以農業生產增長了 12 倍，而農業用水量只增長了 3.3 倍，以色列先進的灌溉技術對以色列的農業發展發揮了重要作用。（駐以色列經商參處，2010）

●以色列的水資源管理

以色列水利法規定，以境內所有水資源都歸國家所有，必須專門用於滿足居民需要及國家發展需要。以水利委員會負責全國水資源的管理，包括制定水利政策、分配用水配額、制定用水計劃與水資源發展規劃，以及防止污染、開發廢水、研製海水淡化設備、保護土壤和排污等工作。以水利委員會每年將 70%的用水配額分配給農業生產者，然後再根據總降水量，分配剩餘的配額。為鼓勵節水，以水利委員會規定農業生產者按其用水量佔其用水配額的百分比繳納費用。

●以色列之農業用水技術簡介

以農業用水技術在國際上處於領先低位，農業節水能力很強。例如，由於使用了低壓管路灌溉方法，以色列單位面積土地的耗水量已下降了 50%-70%。

現在，以色列境內的灌溉土地都使用了這種灌溉方法。此外，許多田間作物都使用處理後的廢水灌溉，通過使用迴圈水，不僅節約了水資源，同時有利於生態環境。以色列用於農業生產的處理後廢水約為 2.3 億立方公尺，且該數字還在不斷增長。以色列水利委員會希望實現到 2010 年，三分之一的農業用水為處理後廢水的目標，以減少可飲用水在農業生產中的使用比例。

(一) 低壓管路灌溉技術(Low pressure pipeline irrigation technology)

以色列在灌溉領域具有廣泛的經驗，並以此為基礎開發出了一系列新的灌溉技術，這些技術現在已成功地進入國際市場。以色列滴灌設備生產商每年都會推出 5-10 種新產品。以色列生產的灌溉設備約有 80%用於出口。以色列的灌溉設備生產商可根據客戶的特殊要求定制產品。來自海外的客戶只要向其提供土壤和農作物類型的田間數據，就可以獲得水質要求、適於此種用水的過濾器的選擇、能防止殘餘物堆積和堵塞的合適的化肥推薦、最佳的灌溉方法以及其他客戶需要的資訊等一系列的專業諮詢。

(二) 滴灌技術(Drip irrigation technology)

以色列的滴灌技術處於國際領先地位。其滴灌設備每小時可供水 1 公升-20 公升不等，最高水利用率可達 95%，非常適用於精準農業種植。例如，無土栽培使用的低流量滴灌噴頭，在溫室中進行精準種植往往需要消耗大量的水，而為溫室應用而設計的滴灌系統，則使用了低流量噴頭，每小時供水僅 200 毫升。這種方法灌溉的一個獨特之處在於水分可以在培養基中均勻擴散，減少了水分的散失。

以色列 80%的灌溉土地都使用了水肥灌溉的方法，使灌溉與施肥同時進行，一次完成。以色列開發了針對廢水灌溉的滴灌頭，它能控制水的流量，並且能防止堵塞。以色列生產的滴灌管線中安裝了過濾筒，它是一種塑膠的多齒元件，當水流經過濾筒時，會產生渦流，可以拋掉其中的塵粒，以防止狹窄的滴頭出口受堵。

滴灌系統主要由首部樞紐、管路和滴頭三部分組成。

- **首部樞紐**：包括水泵(及動力機)、化肥罐篩檢程式、控制與測量儀錶等。其作用是抽水、施肥、過濾，以一定的壓力將一定數量的水送入幹管。
- **管路**：包括幹管、支管、毛管以及必要的調節設備(如壓力錶、閘閥、流量調節器 等)。其作用是將加壓水均勻地輸送到滴頭。
- **滴頭**：其作用是使水流經過微小的孔道，形成能量損失，減小其壓力，使它以點滴的方式滴人土壤中。滴頭通常放在土壤表面，亦可以淺埋保護。

(三) 埋藏式灌溉技術(Buried irrigation technology)

以色列從滴灌技術中又派生出一個新的灌溉方法，就是把管線埋藏在地下 50 釐米深處的埋藏式灌溉，這種灌溉方式可以保持地表乾燥，即使是灌溉時也不影響田間作業。在這種埋藏式滴灌系統中使用了一種叫塔普蘭（Tarplan）的材料，它可以阻止滴頭附近的根須的生長，從而使滴灌系統免於被細小的根須穿透。當水閥關掉，停止灌溉時，滴灌系統的氣門會打開，使管線內充入空氣，防止外來的塵土被吸入滴灌頭。以色列還開發了多種滴灌頭，如管線滴頭、可調和非可調固定滴頭，以及預先鑄入滴灌管壁的集中式滴頭等。

(四) 噴灑式灌溉技術(Spray Irrigation Technology)

採用這種方法，可以讓每棵樹都擁有一個獨自的噴灑器為其灌溉。以色列還開發了一系列主要用於果園和溫室灌溉的噴灑器附屬產品。使用噴灑式灌溉的耗水量大約在每小時 30-300 公升之間，這種灌溉方式可以使水的有效利用率達 85%。

(五) 散佈式灌溉技術(Distribution irrigation technology)

散佈器主要是為田間作物的灌溉所設計的，因為這種灌溉方式適合於大區域灌溉的要求。使用散佈器可以使水的利用率達到 70%-80%（傳統的開放式灌溉，水的利用率只有約 40%）。

(六) 灌溉系統的操作(Irrigation s ystem)

以色列所有的灌溉方式都可以採用電腦控制完成自動化灌溉系統。電腦化操作可完成實時控制，也可執行一系列操作程式，完成監視工作，且能長時間工作，精密、可靠、節省人力。在灌溉過程中，如果系統記錄下水肥施用量與要求相比有一定偏差，系統會自動地關閉灌溉裝置，電腦系統還允許操作者預先設定程式，有間隔地進行灌溉。這些系統中有可以幫助收集灌溉資訊的感測器，如埋在地下的濕度感測器，負責收集土壤濕度資訊。還有一種感測器，它能通過檢測植物的莖和果實的直徑變化，來決定對植物的灌溉間隔，這種感測器直接和電腦相聯，當需要灌溉時，它會自動打開灌溉系統進行操作。

另外舉美國加州為例，水是農業的命脈"在加州被理解和體現的最為透徹，其是加州農業得以成功和持續的根本。加州水資源匱乏，且地域分佈不均勻。農業用水主要來源於北部高山積雪融化後的"北水南調"渠道引水、自然降水和開采地下水。但是積雪融水和自然降水總量有限，開採地下水不僅投資大，而且帶來地下水位下降等系列的負效應，傳統的灌溉技術不僅浪費水源，而且加重了鹽鹼危害程度，因而改進灌溉技術，發展農業綜合節水技術，提高單位水資源的利用率和效益，顯得非常重要。加州 90%的種植農田具備灌溉條件，其中 69%為地表重力灌溉，18%為噴灌，12%為滴灌，不到 1%為地下灌。綜合節水技術被廣泛應用於不同的灌溉模式中。地表重力灌溉被應用在各種種植模式中，節水技術主要在以下四個方面得以體現：一是因土壤作物灌溉制度和定額的確定；二是利用鐳射技術平整土地；三是栽培種植輪作；四是灌溉後排水的回收迴圈利用和對鹽漬化影響的處理。田間裝備灌溉（噴、滴和地下灌）被廣泛應用於經濟作物的種植中，提高節水效益主要考慮以下方面：一是裝備、用

水花費與產出收益間的合理比價；二是植物營養需求、農產品品質改善驅動下的水、肥一體化灌施；三是在嚴重乾旱區域（降水在 200mm 以下，蒸降比在 5 以上）重點實施補充灌溉；四是完全電腦監控下的精確灌溉；五是降低田間灌溉設備成本的安裝佈局或設備改造。現代化的灌溉裝備和綜合節水技術，加上行之有效的管理，極大地促進了加州旱作節水農業的發展。據統計，1995 年加州農業的用水量僅相當且略低於 1967 年的用水量水準，但其種植業總產卻比 1967 年高出 67%。

美國加州農業發達而水資源相對貧乏，為解決這一矛盾，加州採取了各種節水工程技術措施，可以說世界先進節水灌溉技術在加州都得到了較好應用。以下就加州節水灌溉的一些主要措施作一介紹。

(一) 地面灌水技術

地面灌水技術在美國農業灌溉中占主導地位，60%以上的農業灌溉採用這種灌水技術，其方法主要有溝灌、畦灌。美國的溝灌與畦灌是經過技術改良的，它融合著現代最新技術成果與科研成就，所以傳統的灌溉方法在美國仍然具有較高的科技意涵。

(二) 溝灌

溝灌是美國地面灌溉的主體，約占地面灌溉的 70%以上，主要應用於果樹和棉花、花生、蔬菜等行棵型種植作物。對果樹而言，根據行距的不同，一般兩行果樹之間開 3～5 個灌水溝，大田作物則根據其種植特點布置灌水溝。與溝灌相配套的灌水器材主要有：

1. 多口門給水栓，這種給水栓露出地面 30～40 cm，給水栓周圍均勻設置若幹個小閘門出水口，每個出水口出水量不大，分別對應一個灌水溝，這種給水栓最多設有 8 個口門，同時可給 8 條灌水溝灌水。
2. 多出口輸水管，這種管多是鋁合金管，在鋁合金管上與灌水溝的間距對等布設小閘門，每個小閘門對應一個灌水溝，灌溉時可根據供水量或需要，開啟一個或多個口門進行灌溉，亦可進行輪灌。這種管屬地面移動管，作物耕種時收起來，種植完後將管擺放在地頭，直至收割期。
3. 虹吸管，這種管就是普遍的橡膠管或軟塑料管。水是通過防滲渠道送到田間，通過節制閘將水位提高，使水位高出田面，利用虹吸原理，一溝一管將水送到田間。
4. 脈沖溝灌發生器(又叫間歇灌溉)。水流通過管道時，脈沖發生器根據指令，左右放水，水流流量一般較大，在灌水溝中快速向前推進，間隔一

段時間後，再進行第二次、第三次沖灌，直至達到灌水要求，利用這一技術較常規溝灌可節水 25%～30%，畦長也可增加。

5. 尾水利用技術，由於流量較大時，溝灌水流向前推進的速度很快，短時間內就可灌到地頭，而這時田間灌水量還沒達到灌水要求，為此要持續一段時間，這樣水就會源源不斷從地頭流出，為利用這些尾水，美國因此而采取尾水回收利用技術，就是在地頭挖一集水溝，把尾水收集起來，利用低揚程泵重新將水送進管道，循環利用。

(三) 畦灌

在美國畦灌主要應用於大田密植作物如小麥等，畦寬度 10 m 左右，畦長 200 m 左右，灌溉時采取大流量快速推進方式，每一畦配套一個給水栓，一次灌一畦，畦田規格根據農場、作物、水源情況確定，同時畦田都經過嚴格的激光平整。因此，美國的畦灌還是相當省水的。這種灌水方式，主要分布在水源相對豐富的河流兩岸，或地下水豐富的地區。

美國的地面灌水技術無論是溝灌或畦灌，其田間大部分都是採用管道輸水，水通過管道直送溝、畦，即使在自流灌區也是如此，因此，輸水過程的水損失相當少。田間通過雷射平整、脈沖灌水、尾水回收利用等技術，灌水均勻度很高，水流均勻入滲，從而提高灌水效率。輸水防滲、田間改造加之相應的配套設備，構成美國地面灌溉節水的三個核心內容。

(四) 噴灌

美國的噴灌形式多種多樣，時針式、滾移式、平移式、卷盤式、支架式都有。支架式從微噴、小噴灌到噴灌呈系列化。滾移式、時針式、平移式、卷盤式與世界各地的形式沒有大的區別，使用範圍上有所側重，草皮養植場以平移式為主，大田作物則多用時針式、平移式或卷盤式。

支架式噴灌即固定式或半固定式噴灌，固定式噴灌與我們常說的概念一致，就是常年不動，從支架到噴頭常年放置野外，這種固定式與相應的耕作機構相配套，不會對耕作造成影響。在畦灌支撐桿與輸水管道的聯接

上，以及噴頭管材、管件設計上，美國都有獨到之處。半固定式與我們習慣概念不完全一樣，準確的稱謂應為“季節性固定噴灌”。就是耕種時收起來，耕種結束後再放置到田間，直到收割期。小噴灌在美國隨處可見，主要用於低矮密植作物，如蔬菜、草莓等。小噴灌是介於微灌和噴灌之間的一種形式，投資省、適用性強。微灌在美國主要用於果樹和環境綠化。

(五) 滴灌

滴灌也是美國應用較多的一種節水灌溉技術，主要應用於葡萄。葡萄園採用的都是滴灌技術，滴灌可提高葡萄產量、改善葡萄品質，從而進一步提高葡萄酒的品質，所以滴灌技術倍受農場主和葡萄酒商的青睞。針對滴灌技術易堵塞的弱點，美國對水質過濾處理極其嚴格，一般採取 3～4 級過濾。壓力可補償式滴頭的研製與應用是滴灌在美國能得以快速發展的一個主要原因。

另外，加州地區早期的「用水移轉」為彼此農田間灌溉用水的移用，直至西元 1987~1993 年共 6 年的期間，加州地區發生史上最嚴重的旱災，各地區缺水問題頻傳，加州水資源機構為因應各用水標的供水需求，於西元 1991 年規劃了許多短期(1 年或低於 1 年)用水轉換辦法。該年加州水資源部門(Department of Water Resources，DRW)亦創立了「乾旱水銀行」，購買灌區之農業用水移轉至特定缺水集水區、農田及周圍的使用者利用，直至西元 1992□1994 年，加州「乾旱水銀行」的規模漸漸發展為地區性用水移轉。

三、 台灣的農業用水與節水技術

農業用水佔全國年總用水量 71%，將協調行政院農業委員會研議農業節水技術，如加強灌溉管路管理、節水型水稻與耕作時期調整等，並輔以農業生產政策之檢討，以增加供水穩定度。例如桃園（15 公頃）及嘉南（585 公頃）地區推廣省水管路灌溉，每年即可節約 3 百萬噸水量，成效良好(水利署，2009)。

農業用水量的 70%用於種植業灌溉，其餘用於林業、牧業、漁業以及農村人畜飲水等。儘管農業用水所占比重近年來明顯下降，但農業仍是我國第一用水大戶，發展高效節水型農業已是各國的基本戰略。

未來可以努力發展的農業節水技術，建議如下：

(一) 農業用水優化配置技術：農業用水水源包括降水、地表水、地下水、土壤水以及經過處理符合水質標準的回歸水、再生水等。通過工程措施與非工程措施，優化配置多種水源，是實現計畫用水、節約用水和提高農業用水

效率的基本要求。並大力推廣各種農業用水工程設施控制與調度方法，高效使用地表水，合理開採地下水。逐步推行農業用水總量控制與定額管理。加快制定各地區不同降水年型農業用水總量指標和不同灌水方法條件下不同作物灌溉用水定額，合理調整農、林、牧、漁各業用水比例。發展土壤品質、旱情監測預測技術，加強大尺度土壤水分時空變異規律研究和土壤品質與旱情指標體系研究；積極研究和開發土壤品質、旱情監測儀器設備。

(二) 高效輸配水技術：農業用水輸配水過程中的水量損失所占比重很大，提高輸水效率是農業節水的主要內容。因地制宜應用管道防滲技術，對輸水損失大、輸水效率低的支渠及其以上管道優先防滲；尤其對台灣管路約有 30% 的滲漏。發展管道輸水技術，改造較小流量管道時優先採用低壓管道輸配水技術；在高揚程提水灌區和有發展自壓管道輸水條件的灌區，優先發展自壓式管道輸水系統。加強不同氣候和土質條件下管道防滲新材料、新工藝、新施工設備的研究；加強管道防滲防漲技術的研究和產品開發。積極發展渠系動態配水技術，發展和應用即時灌溉預報技術；加強灌區用水管理技術的研究與應用，提倡動態計畫用水管理。鼓勵研究、開發與推廣精度高、造價低、適用性強、操作簡便、便於管理和維護的小型量水設備。

(三) 田間灌水技術：田間灌水既是提高灌溉水利用率的最後環節，又是引水、輸水和配水的基礎，改進田間灌水技術是農業節水的重點。改進地面灌水技術，推廣小畦灌溉、細流溝灌、波湧灌溉；合理確定溝畦規格和地面自然坡降，縮小地塊；推廣高精度平整土地技術，鼓勵使用鐳射平整土地；科學控制入畦（溝）流量、水頭、灌水定額等灌水要素，並淘汰無畦漫灌。積極鼓勵在經濟作物種植區、城郊農業區規模經營的地區應用噴灌技術；優先推廣輕小型成套噴灌技術與設備；在山丘區或有自壓條件的地區，鼓勵發展自壓噴灌技術；積極研究和開發低成本、低能耗、使用方便的噴灌設備。在果樹種植、設施農業、高效農業、創匯農業中大力推廣微噴灌與滴灌技術；提倡微灌技術與地膜覆蓋、水肥同步供給等農藝技術有機結合；鼓勵在山坡地利用地面自然坡降發展自壓微噴灌、滴灌、小管出流等微灌技術；鼓勵結合雨水集蓄利用工程，發展和應用低水頭重力式微灌技術；積極研究和開發低成本、低能耗、多用途的微灌設備。

(四) 鼓勵應用精準控制灌溉技術，提倡適時適量灌溉；加強農作物水分生理特性和需水規律研究；積極研究作物生長與土壤水分、土壤養分、空氣濕度、大氣溫度等環境因素的關係。提倡在作物需水臨界期及重要生長發育時期

灌“關鍵水”技術；鼓勵試驗研究作物水分生產函數；研究作物的經濟灌溉定額和最優灌溉制度；加強非充分灌溉和調虧灌溉節水增產機理研究；研究和運用控制性分根交替灌溉技術。

(五) 生物節水與農藝節水技術：生物措施和農藝措施可提高水分利用率和水分生產率，節約灌溉用水量，是農業主要節水措施。提倡灌溉與施肥在時間、數量和使用方式上合理配合，以水調肥、水肥共濟，提高水分和肥料利用率。提倡深耕、深鬆等蓄水保持技術和生物養地技術。改善土壤結構，提高土壤的蓄水、保水、供水能力，增加自然降水的利用率，降低灌溉用水量。重視深耕機具的研究、開發和產業化。在土質較輕、地面坡度較大或降水量較少的地區，積極推廣保護性耕作技術。加強保護性耕作技術中稻桿殘莖覆蓋處理、機械化生物耕作、化學除草劑施用三個關鍵技術的研究；加強適用於不同地區的保護性耕作機具的研製與產業化。發展和應用蒸發抑制技術。提倡在作物需水高峰期對作物葉面噴施抗旱劑；鼓勵具有代謝、成膜和反射作用的抗旱節水技術產品的研究和產業化。推廣抗(耐)旱、高產、優質農作物品種，加快發展抗(耐)旱節水農作物品種選育的分子生物學技術，選育抗旱、耐旱、水分高效利用型新品種。鼓勵使用種衣劑和保水劑進行拌種。加強低成本、多功能保水拌種劑、經濟作物和草場專用保水劑產品和設備的研究與開發。

(六) 降水和回歸水利用技術：提高降水利用率和回歸水重複利用率可直接減少灌溉用水量，是農業節水的最基本內容。推廣降水滯蓄利用技術，積極發展不同作物、不同降水條件下田間水管理技術，並廣建沈砂生態池，推廣協調作物耗水和天然降水的灌溉制度與灌水技術；在旱作農業區，推廣以滯蓄天然降水為主要目的的土地平整技術和改進耕作技術；在水稻種植區，積極推廣水稻淺灌深蓄技術；在乾旱半乾旱地區以及保水能力差的山丘區，推廣魚鱗坑、水準溝等集雨保水技術。推廣灌溉回歸水利用技術，積極發展灌排統一管理技術；在無鹽鹼威脅地區，杜絕無效退泄和低效排水的灌溉水管理技術。大力發展雨水集蓄利用技術。推廣設施農業和庭院集雨技術；推廣工程設施標準化；研究和應用雨水集蓄利用中水質保護技術；積極開發環保型、高效低價雨水彙集、保存、防滲新材料。以日本為例，日本年平均降雨量約為 1,700mm，僅為臺灣年平均降雨量的三分之二，戰後日本為了提高降雨有效利用率，採行將水田湛水深提高至 250mm 的做法，以增進水田的貯留水量；此項技術不僅可提高稻米品質，亦可解決灌溉水量不足的缺水問題。目前臺灣地區水田的湛水深約為 60mm，若能仿

照日本，設法提高湛水深至 250mm，則相當於增加 190mm 之貯留水量；此外，此貯留空間亦可作為滯洪之用，於洪泛時期降低淹水風險，截留之水量則透過地下水補注及水平滲流的方式，回歸供其他標的使用，亦即以「水田即水庫」的構想開發新興水資源。目前台灣已有研究團隊針對雲林地區農業回歸水進行一系列之研究，初步估計，僅雲林縣開發新興農業回歸水的供水能力，已足可支應六輕 2 倍以上的需求，甚至到了非灌期，亦可從農業用水的源頭，直接供應工業所需之用水，下游工業區之用水可確保無虞。

(七) 養殖業節水技術：發展養殖業節水技術，提高牧草灌溉、畜禽飲水、畜禽養殖場舍沖洗、畜禽降溫、水產養殖等養殖業用水效率，是農業節水的一個重要方面。加快發展抗(耐)旱節水優良牧草品種選育技術，選育適合當地自然條件的野生牧草或馴化栽培的人工牧草優良品種；選育深根系、直立小面積葉片、對乾旱缺水的環境具有較強適應性和抵抗能力的優質耐旱牧草。發展和推廣適合天然草地和旱作人工草地的節水抗旱型優良牧草栽培技術，建立與光照資源、水資源特別是降水資源相適應的種植結構和種植制度；合理搭配豆科、禾本科等不同牧草種類，發展和推廣禾本科—豆科、牧草—飼料立體種植或草田輪作技術。大力推廣人工草場的節水灌溉技術，推廣草地節水灌溉制度；因地制宜發展草地灌溉管道防滲襯砌和管道輸水灌溉技術；鼓勵在適宜條件下發展草地噴灌技術；改進草地地面灌水技術；發展草地灌溉用水管理技術；加強牧草需水規律、灌溉制度和灌水方法與技術試驗研究。淘汰草地無畦漫灌技術。發展草原節水耕作技術。提倡應用草原免耕直播技術；發展人工補播和人工種植技術；重視增強草地土壤蓄水保肥能力；大力發展牧區灌溉飼草料基地。發展集約化節水型養殖技術，提倡家畜集中供水與綜合利用；推廣“新型”環保畜禽舍、節水型降溫技術和飲水設備；推廣具有防滲和淨化效果的水質處理結構、磚石結構等集雨技術設施；鼓勵研製節水型、多種動力、構造簡單、使用方便、供水保證率高的自動給水設備。促進節水、高效的工廠化水產養殖設施的研究和推廣使用，逐步淘汰水槽長流供水技術。推廣養殖廢水處理及重複利用技術，推廣養殖廢水厭氧處理後的再利用技術及深度處理和消毒後用於圈舍沖洗的迴圈利用技術；提倡分質供水和多級利用；改變傳統水沖清糞和水泡糞為乾清糞方式；研究和開發低耗能、高效的養殖廢水處理設施。發展畜產品、水產品加工節水技術。鼓勵研究和開發多功能、低成本、節水、環保型加工工藝和技術裝備。

(八) 村鎮節水技術：針對村鎮居民用水分散、農產品加工工藝簡單、村鎮用水效率低、村鎮供水設施簡陋、安全飲用水源不足等特點，發展村鎮節水技術。發展和推廣村鎮集中供水技術。積極推行計畫用水，發展飲用水源開發利用與保護技術。開採地下水應封閉不良含水層，防控苦鹹水、汙廢水等劣質水侵入水源；鼓勵水源保護林草地建設。推行集中供水，積極發展村鎮供水管網優化設計技術。鼓勵研究開發並推廣村鎮家用水錶和節水型用水設施，缺水地區要逐步開展村鎮家庭用水分戶計量。發展村鎮飲用水處理與水質監測技術，水質不達標地區提倡飲用水源集中處理；建立水質檢測制度；鼓勵開發並推廣適宜村鎮管理條件的簡易監測設備和可攜式監測設備。

(九) 發展精緻灌溉：精緻灌溉是針對植物體本身對水份需求量做精準的灌溉，植物體與介質等由於蒸散作用(evapotranspiration, ET)損失了多少水，在下次灌溉時便應加以補充。灌溉管理運用感測技術，許多感測器可用來偵測土壤中含水狀態以了解供應面，偵測空氣的蒸氣壓差以了解植物體的可能失水程度(需求面)，甚至直接量測植物體在缺水或補水過程中的反應，如此可以節省許多無謂的灌溉水量（林平等）。

(十) 發展植物工廠在地生產蔬菜：目前北部食用之蔬菜，大都為南部生產再輸送至北部，以生產蔬菜的植物工廠而言，其用水量是傳統土耕蔬菜種植的10%左右，若是能以在地生產在地銷售經營植物工廠，除了用水量減少之外，甚至還會減少目前南菜北送運輸產生的碳排放。

(十一)建立灌溉與水質建控自動化系統：針對各地氣候、土壤、地形、水源、灌溉系統與作物生產等資訊，結合雲端技術、機電工程、無限感測網路(WSN)、植物本體感測器、土壤品質感測器等等先進科技，建立一套全台適用的灌溉與水質建控自動化系統。

四、結　語

有鑑於氣候變遷，再加上台灣豐沽水期不穩定，因此如何在取水、存水、輸水上更有效率的使用在農業生產上，是一個很嚴肅的課題。必須產、官、學界一起努力，並結合機電工程、無線網路感測技術(WSN)、人工光源、再生能源等先進科技，期使佔全年總用水 70%的農業用水能逐年降低，並移轉給生活與工業用水使用。

參考文獻

1. 水利署統計,2010 http://www.wra.gov.tw/ct.asp?xItem=22921&ctNode=5401&comefrom=lp#5401)
2. 林平、方煒。植物體感測在自動灌溉管理的應用。
3. 駐以色列經商參處，2010， http://big5.ec.com.cn/gate/big5/ccn.mofcom.gov.cn/spbg/show.php?id=9749&ids=
4. 董克宝, 何俊仕,2007, 淺析現代節水農業。安徽農業科學。2007,35(16) :4937-4938。
5. 劉學珍，2009，現代節水農業技術淺析。楊淩職業技術學院學報，第八卷第二期。P42-45。
6. California agriculture and water-saving irrigation and Its Implications, 2006（http://www.hi138.com）
7. Dennis Wichelns, Laurie Houston, David Cone, Qiming Zhu, James E. Wilen,1996, Farmers describe irrigation costs, benefits: Labor costs may offset water savings of sprinkler systems, California Agriculture 50(1):11-18.

農業設施節能技術與系統研發

蔡致榮[1]、吳有恒[2]

1.行政院農業委員會農業試驗所　研究員兼主任秘書

2.行政院農業委員會農業試驗所　助理研究員

摘　要

當世界各國正努力降低碳排放與減緩全球暖化時，降低能源消耗變成必然趨勢。在高緯度國家，溫室控制燃料消耗的主要部分在於加熱，用以控制溫度和濕度，而在台灣溫室降溫反成為主要訴求。本文主要目的在於綜合回顧世界上主要溫室節能技術與系統研發，並討論其代表性應用，除提供溫室節能的基本、技術、政策與節能措施等供參考外，並導引出值得國內深入研究與發展的可能缺口。可以歸結的是目前並無完美的技術可符合溫室與其內部作物所有節能的需求。系統的選擇與操作是基於像氣候類型、種植作物、花費、維修、操作容易性、系統可靠性、系統壽命等各種參數。因此，溫室節能最適合的技術應該是符合種植者大部分需求狀況，並且是在沒有增加能源使用下，增加作物產出而能獲取最大的回收。

一、引　言

從 1980 年代第一次能源危機，石油供應緊縮造成能源價格顯著提升開始，溫室中能源的有效利用已變成研究與發展的主題。2008 年此種能源價格的高漲又再度發生，加上歐洲 CO_2 減量排放新目標的訂定，導致改善能量效率的新技術再度興起，由於能源是溫室產業總生產成本的基本部分，因此減少能源的消耗便成為溫室產業成敗的關鍵。在歐洲，每年空調的能源使用介於 10-30%，取決於不同的區域，由芬蘭的 1900 MJ/m^2、荷蘭的 1500 MJ/m^2 至法國南部的 500-1600 MJ/m^2。主要挑戰在於尋找符合改善能源效率與減少溫室產業 CO_2 排放的雙需求方法。

對溫室而言，能源可能是種植者的最大成本因素，燃料費用的增加讓種植者能源投入的意願降低；然而，為了維持可獲利性，必須維持相同的生產水準，其方法即在於提升能源效率，亦即在相同能源投入下而獲得更多的產出。有很多方法可改進溫室能源效率，有些甚至不必做大的投資。例如，大量能源的節省可透過改進溫室氣候條件之控制而達成，特別是空氣濕度。能源節省可以透過修補溫室之缺陷與洩漏、檢修材料和設備，以及生產過程的有效管理而達成。

在採取基本措施之後，種植者可在節能技術上做投資，例如絕緣材料、煙氣凝結器、熱緩衝桶、保溫網、更好的電腦、更新溫室、替換無效率之鍋爐與安裝熱電聯合系統(CHP)。有時候，新溫室可以建造在接近電廠或工業區附近，利用它們的餘熱在溫室的加熱上。理想上，對節能的投資將以降低能源成本與可能較高生產而賺回。某些國家提供補貼與稅率獎勵以協助具能源效益設備投資的費用。

在溫室降溫方面，除了最極端狀況外，多數情況下降溫系統的使用幾乎均能有令人滿意的效果。許多場合自然通風可被使用並具有良好效果，而且大型且適當設置的通風器通常就是所要求的全部，有時與排氣風扇(強制通風)或部分反射網(遮蔭)聯合以防止過多太陽輻射的進入。在最大環境溫度少於 33℃的地區，通風與遮蔭技術的使用運作良好。在夏季環境溫度超過 40℃的極端區域，蒸發冷卻是溫室降溫最有效率的方法，其能顯著降低溫室內部氣溫使其低於空氣溫度。在溫室內，風扇-水牆與微霧/煙霧的蒸發冷卻以及屋頂蒸發冷卻系統都可使用。除了這些系統外，有兩項組合系統，例如地對空氣熱交換器系統與地下儲水層連結洞流熱交換器系統，可使用於溫室的加熱與降溫(Sethi et al., 2007)。

本文回顧世界上主要溫室節能技術與系統研發，並且討論其代表性應用，除提供溫室節能的基本、技術、政策與節能措施等供參考外，並導引出值得國內深入研究與發展的可能缺口。

二、 溫室節能的基本與荷蘭經驗

(一) 農業節能的兩個觀念(Bakker, 2009)

1. 單位能源生產(能源效率)的增加可經由減少能源的使用與(或)生產的改善來達成。實際上所有增加生產的栽培措施，例如改善灌溉、較佳營養、病蟲害控制與溫室面積的較佳利用，都能有效提升能源效率。
2. 僅關注於能源效率而不考慮絕對能源的使用，可能會導致不可預期的結果。
    (1) 在地中海地區，利用加熱以獲得早期生產與定質量產出，除了有較高的能源效率外，也有較高的絕對能源使用。
    (2) 改善環境控制(例如提供較多的 CO_2、額外光源)、強化生產計劃，以及在高溫月份使用冷卻系統來延長生長期，都造成能源消耗的增加。
    (3) 在高緯度地區使用較強的人工光源(在芬蘭超過 200 W/m^2，而在荷蘭超過 100 W/m^2)也會增加能源的消耗。

(二) 溫室能源消耗與能源效率(Djevic 與 Dimitrijevic, 2004)

能源、經濟與環境為農業生產系統的三個重要因子。近年來由於人口持續增加與生產技術的進步，使得農業能源消耗大幅成長，而溫室生產系統迄今仍是極度消耗農業能源，生產者所面臨的是高操作成本的溫室生產過程(環境控制、施肥、灌溉等)，因此考慮所有投入的能源，並找出能讓生產更具能源效率的最佳組合就變得非常重要。

1. 能源投入分析

能源投入分析包括直接與非直接能源投入的定義、特定植物生產的能源消耗與能源效率，其定義如下：

(1) 直接能源投入：包括石化燃料能源與再生能源的投入，一般佔總能源消耗的三分之一。加熱溫室之直接能源投入對生產者而言最重要，因為其決定生產效率與產物的市場價格。

(2) 非直接能源投入：包括生產設備與其他生產過程中材料(肥料、農藥、人力與運輸)所使用之能源，一般佔總能源消耗的三分之二。

2. 能源消耗與能源效率的定義

特定植物生產之能源消耗：

$$\text{每公斤產物之能源投入(MJ/kg)} = \frac{\text{生產之能源投入(MJ/ha)}}{\text{產出(kg/ha)}}$$

能源效率：

$$\text{能源出入比(ER)} = \frac{\text{產出之卡路里熱值(MJ/ha)}}{\text{生產之能源投入(MJ/ha)}}$$

$$\text{能源生產力(kg/MJ)} = \frac{\text{產出(kg/ha)}}{\text{生產之能源投入(MJ/ha)}}$$

3. 能量分析例

當確定生產系統之能源消耗時，應該提及所涉及分析目的之能量分析方法，傳統方法是確定非太陽能投入而用於產製特定產品之能源需求總數。表 1 呈現冬天萵苣生產之能量投入(僅營運成本)，由於僅計算至產品離開農場，因此運輸投入並沒被計算在內，並且這些能量投入是根據其能量當量加以估計。

表 1. 冬天多跨距塑膠布加熱溫室萵苣生產之能量分析

投入項目	數量	能量	
		GJ/1000 m^2	%
加熱(燃料油)	10-20 t	834	92.9
CO_2 噴注(燃料油)	900 kg	37.5	4.2
殺菌劑	10 kg	0.95	0.1
肥料			
N	43 kg	3.36	0.37
P_2O_5	5 kg	0.087	0.01
K_2O	13.25 kg	0.18	0.02
播種噴灑(seeding sprays)	1.3 kg	0.124	0.01
箱子	2334	16.23	1.81
種子與填塞混合物(blocking compost)	30	4.5	0.5
勞力		0.75	0.08
總計		897.68	100.00

產出：

3.5 kg/m^2 萵苣 ＝3500 kg/1000 m^2 萵苣

2334 箱 x 12 顆/箱 ＝28008 顆萵苣

相關能源比率：

每公斤萵苣能量投入(Energy input/kg lettuce)

$$\frac{897.68\ \mathrm{GJ}/1000\ \mathrm{m}^2}{3500\ \mathrm{kg}/1000\ \mathrm{m}^2} = 256.48\ \mathrm{MJ}/\mathrm{kg}$$

每顆萵苣能量投入(Energy input/head lettuce)

$$\frac{897.68\ \mathrm{GJ}/1000\ \mathrm{m}^2}{28008\ \mathrm{heads}/1000\ \mathrm{m}^2} = 32\ \mathrm{MJ}/\mathrm{head}$$

能源出入比(Energy out-in ratio, ER)

$$\frac{1.46\ \mathrm{GJ}/1000\ \mathrm{m}^2}{897.68\ \mathrm{GJ}/1000\ \mathrm{m}^2} = 0.002$$

(萵苣卡路里熱值0.417 MJ/kg)

能源生產力(Energy productivity)

$$\frac{3500\ \mathrm{kg}/1000\ \mathrm{m}^2}{897.68\ \mathrm{GJ}/1000\ \mathrm{m}^2} = 0.004\ \mathrm{kg}/\mathrm{MJ}$$

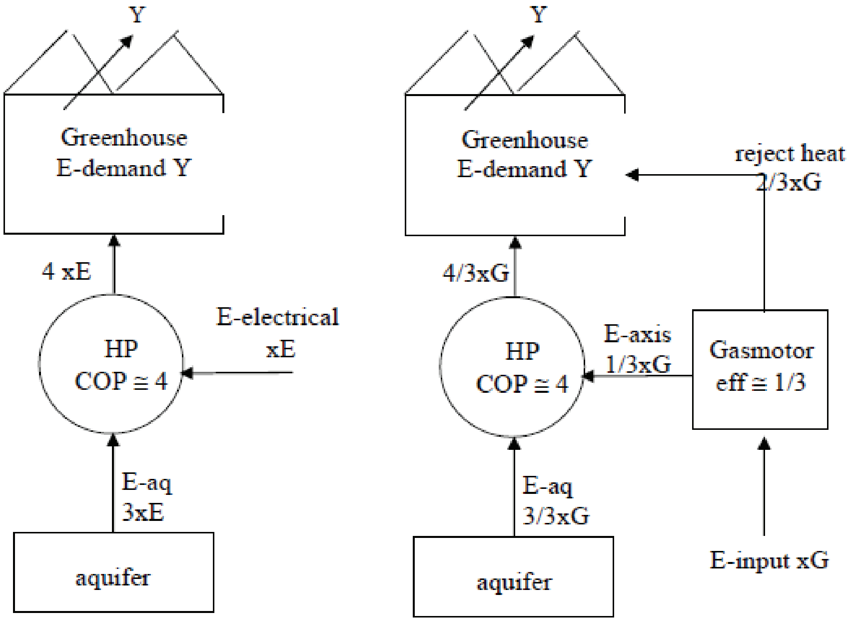
此例中直接能量投入為加熱與 CO_2 增添，而以燃料油型態呈現，其佔總能源消耗的絕大部分，表中可看出必須注意產品的包裝，因為箱子與棧板包含較多的能源數量。此能量分析例所算出之 ER 值與 Enoch (1977)所得類似，相較於動物生產(ER = 0.59)或糧食生產(水稻 ER = 1.3-5，穀物 ER = 1.9)，溫室生產之能源效率(ER = 0.002)很低。此種生產能量分析方法可用於定義特定作物之生產技術與生產區域之氣候參數，或就已經建立之生產領域尋找最大獲利且較少能源消耗之解決方案。最佳化生產程式之計算可以線性程式設計方法開展，其最佳化準則可以是減少能源投入、燃料消耗，或是生產成本。

(三) 荷蘭溫室農業節能經驗(Bot et al., 2005)

最佳化溫室系統通常包括改善之保溫網、改善之氣候控制(溫度、濕度與 CO_2 增添)、輔助光源之改善使用，以及發展低能源消耗之栽培方法。在荷蘭節能之實際限制在於其能源成本只佔總生產成本的 15 至 20%，而農民視能源消耗為降低其生產風險之工具。然而隨著歐盟能源成本新調查系統之使用，能源成本不再與能源消耗成線性比例。

能源成本主要包括尖峰需求(例如最冷時期)之傳輸容量(transport capacity，愈高愈好)所需之成本，以及單位能源投入之商品回收(一般短期內是固定的)。節能主要挑戰在於尋找符合改善能源效率，並結合總能源消耗與減少溫室產業相關 CO_2 排放的方法，因此，節能操作最重要乃在於降低尖峰需求與其所需之傳輸容量，並維持較固定之能源需求，以求達成單位能源之最低總成本。在溫室農業操作上，降低尖峰需求可由使用整合氣象參數之控制邏輯，以及在尖峰需求時期利用保溫網與替代能源(例如生質燃料)而達成，而其他時期之節能策略則僅能節省相對低之商品燃料成本。

對於低能量需求的溫室，可利用絕緣覆蓋、自適性環境控制、整合性控制邏輯與最佳能源管理而實現。在荷蘭約一半的溫室能源需求減少可以經由覆蓋材料之絕緣特性而達成，其挑戰在於同時維持高光穿透性，另一半則由捕捉太陽能並儲存於地下蓄水層以供寒冷時期熱泵使用而實現。各種搭配選項被調查以評估能源投入需求，如圖 1 左所示，使用電源驅動熱泵容許太陽光電系統或風力發電系統之運用，然而當能源需求與供應不能匹配時仍需使用公共電力網當備用系統。就 20 NGE/m^2 之能源需求而言，目前可能最佳之可用系統(具保溫網之雙層覆蓋溫室)每平方公尺大約需要 100 kWh 的驅動能源。以此需求而言，每公頃溫室倘使用太陽光電系統依現在效率需要大約 1.2 ha 之覆蓋面積，或額定功率能量大約 600 kW 之風力發電系統。



電源驅動熱泵	具廢熱回收之燃氣驅動熱泵
需求 Y = 4xE	需求 Y = 2xG
輸入 xE = 1/4 Y = 1/2 xG	輸入 xG = 1/2 Y
從地下蓄水層提供 3/4 Y	從地下蓄水層提供 1/2 Y

圖1. 能量輸入以滿足溫室之能量需求Y(Bot et al., 2005)

三、 溫室節能技術回顧與目前現況

2020年開始，荷蘭限制新建溫室必須在幾乎沒有任何礦物燃料下運作，甚至能夠生產能量(energy producing)，其主要想法是將溫室當成太陽能收集器，可以收集80%進入溫室內的太陽輻射。在西北歐，每年太陽能的照射量為3.5 GJ/m^2，相當於100 m^3天然氣(= 100 NGE)的燃燒值。由於射入溫室的太陽輻射約是溫室本身使用能源的兩倍，溫室因此可以同時作為作物生產系統與產熱系統。一個以 “溫室作為能源來源(Greenhouse as Energy Source)”的研發計畫即是利用此想法，其主要方法為：太陽輻射的最大化使用、降低溫室能源的使用與其他永續性資源代替礦物燃料(Bakker, 2009)。

(一) 太陽輻射的最大化使用

增加溫室能源效益的第一步是將進入溫室內的自然輻射最大化使用，使其對生產具有最大的正面效果，並僅需最小的額外加熱。為達上述目的，可藉由改進溫室架構以增加其光穿透性、修改屋頂斜度而使溫室具備最小的反射損失。在南歐，光穿透性的提升可由增加屋頂斜度來達成，在雨量較低的地區，傾斜度約是 0-30 度。在西北歐，可藉由結構組件的最小化來改善光的傳輸，例如最小排水溝尺寸、使用寬玻璃，以及利用白色來塗佈框架以減少結構組件對光的吸收。

溫室覆蓋材料可分成 3 類：玻璃、塑膠膜與硬塑膠片，每種覆蓋材料均具備不同波長的光穿透性。就能量效率而言，可見光與紅外光的穿透是極重要的，冷的時期，覆蓋材料應該具備可見光高穿透性、紅外光的低穿透性，以及高絕緣性。當來自於溫室內的紅外光損失被限制，這些材料讓最大數量的太陽能量進入溫室成為可能，並用於作物生產與增加溫度。由於紅外光具高穿透率，對具能源效益溫室使用而言，除了 ETFE(fluoropolymer ethylene tetrafluoroethylene)膜以外，很多塑膠膜材料是次理想的。

為進一步改善材料的光穿透性，幾十年來數種抗反射(antireflex)的塗料被用以防止光的反射，這使得光的穿透率增加 5-6% (圖 2)。塗料也能減少因凝結所致之光量減少，這對塑膠材料尤其重要。在這領域新近創新是利用溫室覆蓋技術 micro V 修改表面架構，但由於覆蓋材料的光穿透性可能因灰塵而顯著降低，因此只有定期清潔這些覆蓋材料才能顯現出其潛在的效應。

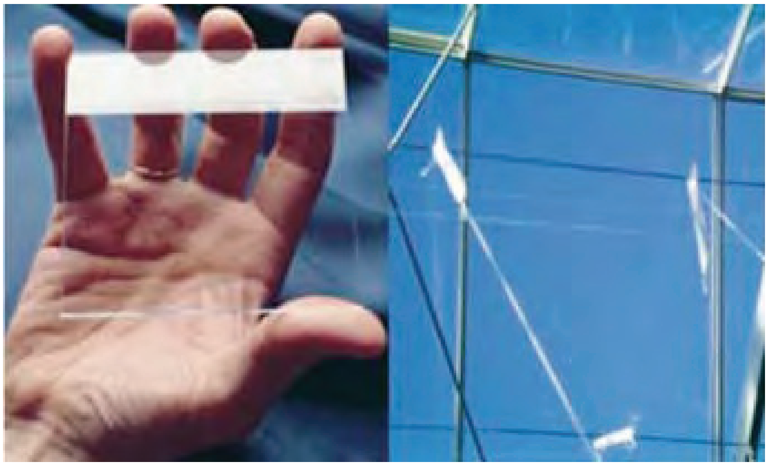


圖2. 數種抗反射(antireflex)塗料用以防止光的反射，使得光穿透率增加 5-6% (Bakker, 2009)

(二) 減少溫室能源的使用

1. 最小化遮網與絕緣材料所導致之能源損失

自然通風溫室能源損失的主要過程有：(1)來自溫室覆蓋的對流與輻射(2)經由通風的熱與潛熱傳輸。因此，改進絕緣並且降低通風是創造保能溫室的第一步。保溫網在溫室和環境之間增加額外的障礙並降低對流與通風損失；當可移動時，相較於固定的遮網或雙覆蓋材料，其對光穿透性影響較少。在荷蘭大約 80%與法國大約 35%的溫室地區都裝有保溫網。理論上，保溫網可減少 35-40%的能源使用，其主要取決於材料。

增加溫室覆蓋的絕緣值對溫室能源消耗有重大影響。然而，大部分固定絕緣覆蓋的主要缺點在於光穿透的減少與濕度的增加。發展具備高絕緣值與高光穿透性的材料是最具挑戰的問題之一。但實際的狀況是，二層與三層覆蓋材料的節能潛力幾乎從未達成，因為種植者總試著藉由增加溫室環境的除濕來補償其負面效果。

Lexan® ZigZag™溫室覆蓋材料(如圖 3 所示)是結合高光穿透(就直接光而言 90%，漫射光則為 80%)與高絕緣值材料的例子，相較於單層玻璃，每年可節省 20-25%能源(Sonneveld 與 Swinkels, 2005)。令人遺憾的是，由於額外成本、低的總經濟利益及溫室結構生產與修改問題，此種材料的大量實際應用尚未成功；未來有希望的選擇有塗佈 Anti Reflex 的雙面玻璃、micro V 處理的玻璃組合或三層系統 (Bot et al., 2005)。例如，塗佈 Anti Reflex 的雙面玻璃，可以容易地與當今溫室結構結合使用，由於結合高散射光穿透傳輸(82-86%)與能量削減(26%)，使能源效率增加了 40%。

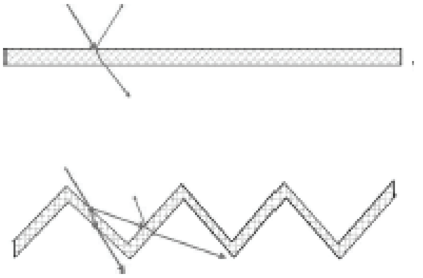
2. 控制通風與潛熱以最小化能量損失

以周年為基礎，從溫室到環境能量轉移的主要部分乃透過自然通風。因此，很多降低溫室能量投入的測試中，多集中在通風過程與其對熱與質量轉移的影響。在輻射與外界溫度相對較低時期，自然或強制通風常被用以防止高濕度，其與能源消耗的顯要(5 到 20%)部分有關。在提升與濕度控制相關能源效率的選項有：較高的濕度設定點、降低作物的蒸散位準，或以回收熱除濕(Campen 與 Bot, 2002)。

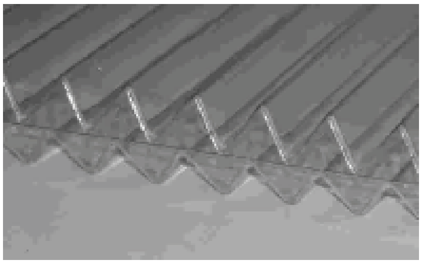
儘管高濕度通常與增加真菌疾病的風險及降低品質相關(例如 botrytis, blossom end rot)，在亞熱帶區域適度情況下，提高濕度對作物生產與品質可能有益，並因此增加能源效率。

蒸散的減少也對能源效率有正面影響，因為蒸散較少的作物把較少的水帶到空氣中，因此在低輻射狀況下濕度控制僅需較少的能量。兩種方式顯示可減少蒸散，包括使用抗蒸散劑(antitranspirants)與降低葉面積。抗蒸散劑結合較高的 CO_2 濃度，可在對光合作用與生長無影響下提升 5-10%能源效率。作物葉面積的控制性降低，例如甜椒的高葉面積指數，可在對生產無影響下降低能源使用；而摘除蕃茄老葉使葉面積減半降低 30%的蒸散，並對產量沒有不利影響(Adams et al.,2002)。

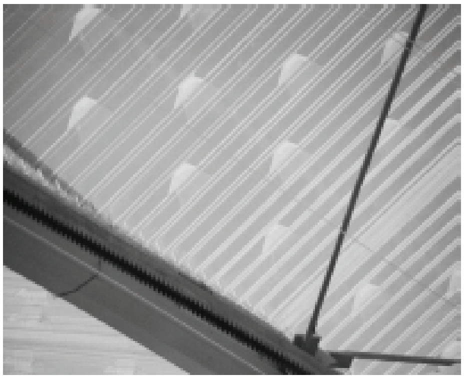
控制潛熱或使用沒有通風的完全密閉溫室可降低通風率以最小化能量損失，而此種操作需要技術性方法以解決避免高溫度與溼度(Opdam et al., 2005)。就半乾旱地區而言，具能源效益的除濕系統是基於熱泵的冷卻與除濕系統，並結合熱交換器與熱量回復使用(Buchholz et al., 2005)。然而，商業運作中，此種應用至今仍然有限，因為就作物生產與節能而言，經濟性的好處仍然無法符合額外費用的投入。



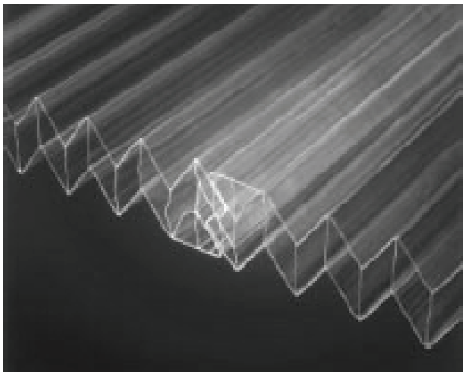
光束撞及平板穿透與反射之原理(上)與Zigzag板(下)



真空成形技術所製造第一雙層Zigzag結構的例子



真空成形ZigZag在內外層間有三角形間隔器



兩擠壓成型ZigZag Lexan嵌板結合在一起

圖3. ZigZag™溫室覆蓋材料

3. 具能源效益的冷卻

幾乎所有地區，特別是在南方緯度地區，就整年而論，需要有效率的冷卻系統以降低溫室內的空氣溫度。自然通風是溫室冷卻最常用的方法，而最佳化溫室幾何結構是設計自然通風系統的主要技術。屋頂斜度達 30^o 時通風率顯著增加，因此傳統水平屋頂的溫室可以對稱或不對稱的斜頂溫室加以替換。

遮蔭是被動性冷卻(passive cooling)的常用方法，安裝於溫室內部或外面的移動式遮蔭可改善冷卻系統，其可吸收或反射不同波長的光。熱絡顏料的特定材料可用以降低熱負荷，但此種材料大部分也減低 PAR 位準。反射植物生長不必要太陽能源(近紅外光，NIR)的材料也可用於溫室覆蓋或遮網的材料(Hemming et al., 2006)。

不同的主動式(active)冷卻與機械通風系統的比較顯示，除了直接與非直接的蒸發冷卻外，其投資收益並不好。直接蒸發冷卻係透過細霧(misting)與風扇水牆冷卻給予最佳的結果，並且主要是透過對生產的影響而增加能源效率。

Kumar et al.(2009)綜合回顧夏季溫室降溫設計技術，同時也討論對溫室微氣候的影響與所適用的降溫技術，結果顯示除冷卻外，在溫室設計、新覆蓋材料的評估，以及區域氣候與農藝狀況的自然通風研究都是必須的。早期研究分析也顯示具大通風面積(15-30%)、在溫室屋脊與側邊提供通風、覆蓋 20-40 網目的防蟲網，以及被覆具白天可反射 NIR 而夜間可反射 FIR 特性材料的自然通風溫室適合熱帶與亞熱帶地區整年的作物生產。

4. 具能源效益的操作控制

高效率的溫室環境控制有助於改進具能源效益的溫室生產，而增加對作物生理的認識，以及作物與環境相互作用的知識，並結合有效率的溫室環境控制，可使溫室生產更具能源效益。實質上降低能源使用的方法之一是使用溫度累積(Temperature Integration, TI)，主要乃因很多作物是回應溫度累積而不是每日變化(diurnal variation)。TI 使用的第一個報告回溯至 20 年前，其係利用基於風速設定值的操作以提升節能，並且預報 5-10%的節省(Bailey, 1985)。

較常利用的 TI 策略是使用比正常氣孔溫度較高的溫度，並且在夜裡或陰暗天以低溫運轉進行補償。能量節省將取決於作物與允許的溫度波動，而每年達 16%的節省是可能的。在更密閉的溫室，此種方法被用於白天以降低冷卻功率；於夜晚當不需要 CO_2 時，結合正常通風也可降低所需容量與冷水總量，並使系統更經濟可行。

濕度控制策略也對由於溫度累積所致的節省有很大影響。當溫度下降時，降低通風與加熱導致相對濕度的增加，並且濕度控制可能抵銷由於 TI 所致的節省，而較高 RH 設定值與動態濕度控制可顯著地降低能源使用(Korner, 2003)。

在能源效率上欲獲得環境控制的最大利潤，控制必須不再追求環境因子或像加熱、通風與 CO_2 供應的作動器，而是具能源效益的作物生產與品質控制。這必須根基於控制系統，其中控制作動對作物生產和能源消耗的影響必須加以考量，而此種方法自 1980 年代初已被遵循了數十年。Challa 與 van de Vooren (1980)最先描述小黃瓜生產能源消耗與早熟(earliness)間的最優化常規。下一步是使用作物光合作用與蒸散上相對簡單的模式，隨後再接著更複雜的物理模式與光合作用模式。第一個應用例子是保溫網的操作控制，其中並針對生產的旺盛效應加以平衡。Dieleman 與 Kempkes (2006)指出就番茄而言，當延遲打開保溫網使暴露於 50-150 W/m^2 以上輻射，可在不影響生產下獲得達 4%的額外能源節省。

迄今，尚少考量作物生產和能源消耗的溫室線上控制模式，現有模式甚至很少被使用於溫室的線上控制過程中，因為其大部分並不適於線上控制使用。新環境控制技術的導入將增加能量效率，但透過簡單的改進，像是加熱與通風系統的硬體設計、改進感測器網路之準確與控制頻率，以及設定值的定期檢查等，也可大幅改進能源效率。

(三) 以其他永續資源代替礦物燃料有助於減低 CO_2 排放

由於 CO_2 的排放直接與加熱和冷卻溫室的礦物燃料使用有關，例如太陽能與地熱能、生物質量與廢熱之替代選項有助於減低 CO_2 排放目標。在荷蘭使用由熱電聯合系統(CHP)提供之廢熱與 CO_2，溫室產業節省大約 1×10^9 m^3 的天然氣，並把所產生的綠色電力出售到國家電網。儘管不在溫室層級直接節省能源，CHP 透過降低中心電廠的 CO_2 排放而在國家層級降低 CO_2 排放。不過，在其他國家的情況可能有所差異，因為 CHP 的經濟性目前可能不是合適的。生物質量和厭氣消化是礦物燃料外的另類選擇，但其可用性與巨大數量需求成為大規模應用的主要缺點。因為，1 百萬瓦生物質量來源需要大約每年 2500 公頓的乾物。在不同地區，地熱能(水溫>60°C)可能是另一大有可為的選擇。世界上的多數地區(例如土耳其、德國)具有地熱潛力，其就溫室加熱而言可能是經濟可行的。2007 年第一個地熱加溫溫室在荷蘭被實現，其主要是一個利用 5 百萬瓦地熱源的番茄溫室(面積 7.25

公頃)，使用來自 1700 m 深度及 65 °C 的水進行加熱。目前，大約有 25 個計畫正在可行性研究或初次鑽探的階段。

Pereira(2002)指出利用海洋深層水的冷度，可以在熱帶沙漠地區為作物根區創造終年像春天的微氣候，其可產生熱帶、亞熱帶與溫帶作物生長的理想狀況，因而形成所謂的“低冷農業技術(Cold water Agriculture, ColdAg)”，其特點有：1.根圈溫度控制；2.由水汽冷凝至土壤形成自我灌溉；3.根葉間溫差促使植物快速生長(3 倍於傳統)，產品並具高糖與芳香成分；4.由操縱植物休眠(強迫或打破)至每年多輪作生產；5.完全不排放廢水。

(四) 可供溫室加熱與降溫使用的組合系統(Sethi 與 Sharma, 2007c)

1. 地對空氣熱交換器系統

利用地球質量，可以建立良好的地對空氣熱交換器系統(Earth-to-Air Heat Exchanger System, EAHES)。由於大地整年溫度(26-28℃)幾乎固定，大地土地勢能可以在夏天時用來冷卻溫室或畜舍。在此種狀況，溫室熱空氣經由所埋管子(2-4 m 深度)而循環並將熱驅散至地下土壤中。不過，文獻回顧評論顯示很少的研究專門探索供農業溫室使用 EAHES 的冷卻潛能。

使用 EAHES 調控溫室狀況的模擬研究由 Levit et al.(1989)在阿根廷 Pampa 地區潮濕的 43 x7.2 m^2 農業溫室中執行，溫室係以單層 PE 塑膠布(厚度 150 lm)所覆蓋，管子係由埋在 1.2 m 深度的鍍鋅鐵板做成，其冷卻性能未能確切知曉。Schiller (1992)開發使用地管被動冷卻的暫態數值模式以預測地對空氣熱交換器系統的性能。Mihalakakou et al. (1994)研究地表覆蓋對於單與多排平行埋管冷卻性能的影響，調查埋在土壤下此兩系統的冷卻潛能，並與相同系統被埋在短草覆蓋土壤下的冷卻潛能相比較，結果顯示土壤表面覆蓋可能是改進 EAHES 性能的可控制因子。Santamouris et al. (1994)描述一 1000 m^2 被動式太陽能農業溫室原型的設計、建造與操作，儘管溫室被以降低熱損失而設計，並在每日與季節性基礎上增加有用的太陽能獲得，而 EAHES 冷卻潛能被發現是非常重要的。

Santamouris et al. (1995b)針對農業溫室降溫節能方面研究 EAHES 的性能，就特定的玻璃溫室的參數分析被進行以說明管長、管徑與管內風速對此系統性能的影響。由裝有 4 支埋管、1000 m^2 玻璃纖維覆蓋的溫室所收集室內氣溫的測量數據，被用與計算所得數據相比較，結果發現非常吻合。Kumar et al. (2003)開發數值模式以預測 EAHES 的節能潛

能與大樓的被動式熱能性能，此模式針對在印度 Mathura 相似隧道的試驗數據進行驗證，結果被使用以研究非空調大樓的熱能性能，80 m 地下隧道的冷卻潛能(19 千瓦)被發現足夠維持 27.65℃的平均室溫。

Ghosal et al.(2004) 發展簡化分析模式以研究再循環型式(recirculation type) EAHES 結合溫室(位於印度 Delhi)的整年效力，其計算係針對典型的夏天而做，溫室的空氣溫度在夏季被發現比相同溫室沒有 EAHES 運轉下較低平均 3-4℃。Ghosal 與 Tiwari (2006)執行的另一項研究中，熱力模式被發展以調查藉助於 EAHES 下使用地底所儲存熱能供溫室降溫的潛能。針對 EAHES 結合溫室的參數研究說明埋管長度、管直徑、空氣的質流率、地下深度與土壤類型對溫室氣溫的影響。具有 EAHES 試驗參數的溫室空氣溫度在夏天，發現平均比相同溫室但沒有 EAHES 者低 5-6℃。

除了這些研究，Santamouris et al. (1995a)與 Agririou et al. (1996)也探索大樓冷卻用途 EAHES 的使用，並且發現其在降低內部氣溫非常有效，因為與溫室相較此種應用並沒有直接的太陽輻射進入大樓圍區。總之，應用地對空氣熱交換器系統者與控制溫室相較可以降低內部氣溫 3-5℃。不過，使用 EAHES 的主要缺點在於土壤鑽挖，並把管子置放達 2-4 m 深的費用。在此種深度管網的水平置放與配管並非容易，一但置放管路狀態與來自接點的滲漏都無法檢查。而在土壤壓力下金屬管路的腐蝕與塑膠管的劣化也使長時期計劃中此種系統變得較不可信任。

2. 地下儲水層連結洞流熱交換器系統

Sethi 與 Sharma (2007a)在印度 Chandigarh 的 Panjab 大學設計並開發地下儲水層連結洞流熱交換器系統(Aquifer Coupled Cavity Flow Heat Exchanger System, ACCFHES)，以供 $24m^2$ 地板面積、種植辣椒的農業溫室加熱與冷卻時使用。此系統使用由地表灌溉管水池而來地下儲水層的水進行溫室降溫，其幾乎整年都在大約 24℃的恆溫。簡單的蒸發冷卻過程在極端夏天狀況也被增加至此現有系統中，試驗結果顯示極端夏天狀況下內部房間氣溫比環境氣溫低 6-7℃。Sethi 與 Sharma (2007b)也發展溫室整合 ACCFHES 的熱力模式，此模式也針對先前研究所獲得試驗結果進行驗證，據觀察此溫室降溫的預測數值與測定數值非常接近，並顯現 3.12%的均方差(mean square deviation, χ^2)，參數研究也被進行以優化系統參數。

(五) 具能源效益溫室的新設計

儘管個別節能組件的開發與運用實施能導致能源的節省，欲達成在CO_2排放與能源產製溫室上有雄心目標的唯一方法，在於整合包括覆蓋材料、加熱與通風/除濕、控制演算法及能量轉換系統之節能溫室系統(energy conservative greenhouse systems)。Bot et al.(2005)所發展理論太陽溫室概念(如圖 4 所示)乃具能源效益設計的好例子，包括能量轉換技術與最佳控制的所有組件都被合併在內。此太陽溫室計畫的目標在於不使用礦物燃料而開發高價值作物生產用的溫室系統。系統概念是在夏天收集儘量多的熱以平衡冬天最小化的能量需求。結合動態控制上的控制演算法，此系統可導致60%的總可實現能源節省(total realizable energy saving)。這使得永續能源供應變成可行，而其所需每公頃溫室只要 600 千瓦的能源可由風力或太陽能光電板而獲得。

藉由完全與半密閉溫室(Opdam et al., 2005)，設計的下一步係要在夏天抽取總過剩熱並以溫度在 25-30^oC 的熱水形式儲存在長期熱儲存器(地下蓄水層)：包含砂層的隔絕水，通常深度在 100-200 m。在冬天時期，熱被使用熱幫從地下蓄水層中抽提，並重新使用於所謂的“能源產製溫室”以加熱溫室本身、相鄰溫室或建築物(圖 5)。

欲達到這目的，把溫室當成太陽能收集器的性能必須藉由進一步減低熱損失與使用非常有效熱交換器(圖 6)以最大化熱收集而加以最大化。在荷蘭 Bergerden 所謂的“能源產製溫室”係使用這個系統的第一個商業規模溫室的第一個試驗，其顯示溫室的淨能源剩餘尚無法達成，因為輸出受限於種植者的溫度限制範圍與為最小化預期對作物不利影響所致遮蔭網的頻繁使用。此熱產製系統的缺點是系統所傳送低位準的能量(水在 40^oC 下)，此需要修改加熱系統而且必須在溫室的鄰近地區被直接使用。不過，從溫室到都市環境的熱傳遞(溫室在能量網格中)在荷蘭人口非常稠密的 Westland 地區是一真正選項。目前至少一項商業計畫正在發展的階段，而幾種熱產製溫室的改進設計正在 Bleiswijk 位於 Wageningen UR Greenhouse Horticulture 所謂能源產製溫室創意與示範中心(Innovation and Demonstration Centre for Energy Producing Greenhouses)內測試(圖 7)。

荷蘭 Zonneterp 溫室村(圖 8)係包括生態住宅區作為能量產製溫室進一步發展之示範計畫，乃 Innovation Network 有關溫室村之成果，其呈現具有分散式水與廢水處理設施，並以溫室產生熱能提供社區之設計。此種設計係基於在夏天從太陽輻射捕獲過剩熱之創新溫室，其熱能被儲存在地下自然水池(地下儲水層)中，並在夜裡或冬天使用以暖和溫室。能量平衡顯示仍有足夠能量剩下可用以加熱大量之房子(2 公頃溫室可以加熱達 200 戶房子)。另外，溫室可提供自來水、處理廢水並產製電力，整個溫室組合在能

源與水方面係屬自足，並循環再利用營養與碳。因此，溫室村是符合生態永續性、環境友善性與經濟可行性之解決方案。(Andel et al., 2007)

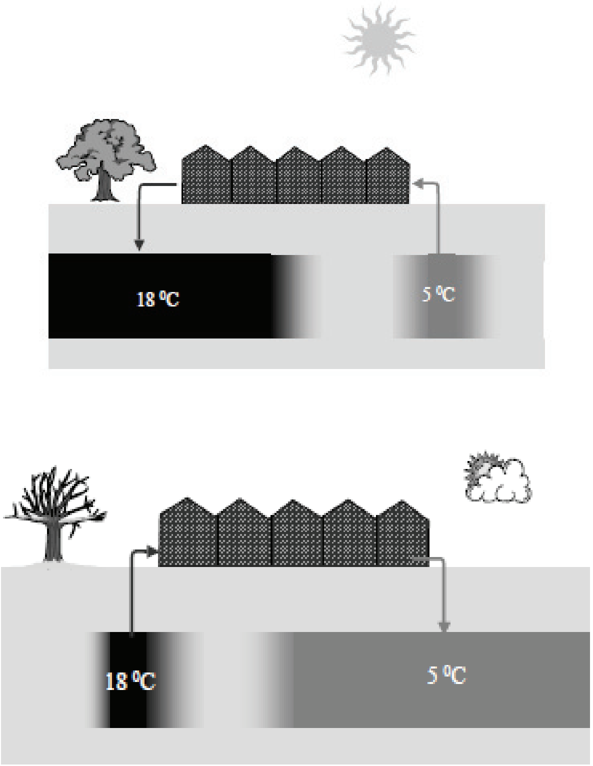


圖4. 地下蓄水層示意圖(Bot et al., 2005)：夏天時(上)溫部被填充而冷部被清空，冬天時(下)溫部被清空而冷部被填充。

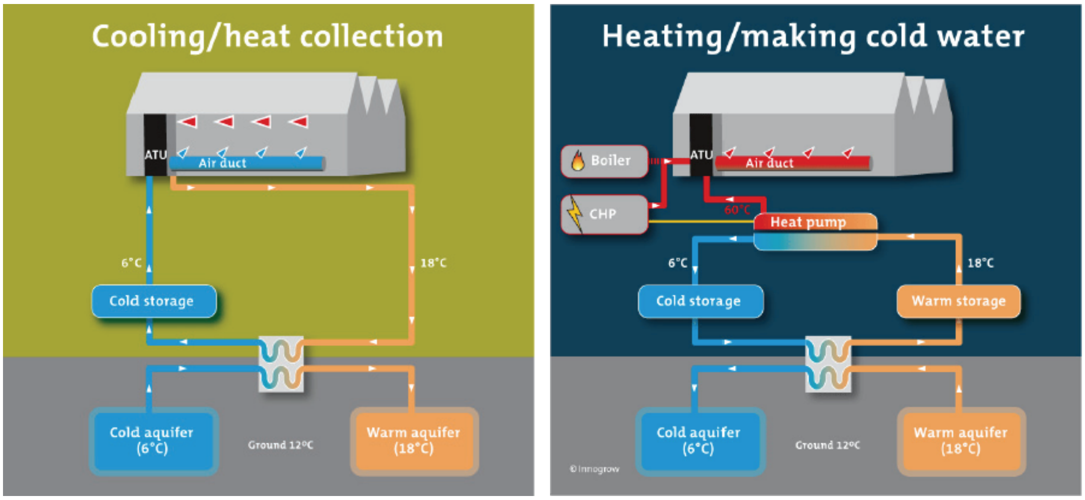


圖5. 密閉溫室的作用(摘自Innogrow公司)

圖6. 在“能源產製溫室”中，把溫室當成太陽能收集器的性能必須藉由減低熱損失與非常有效的熱交換器以最大化熱收集。

圖7. 幾種熱產製溫室的改進設計正在Bleiswijk位於Wageningen UR Greenhouse Horticulture所謂能源產製溫室創意與示範中心內測試。

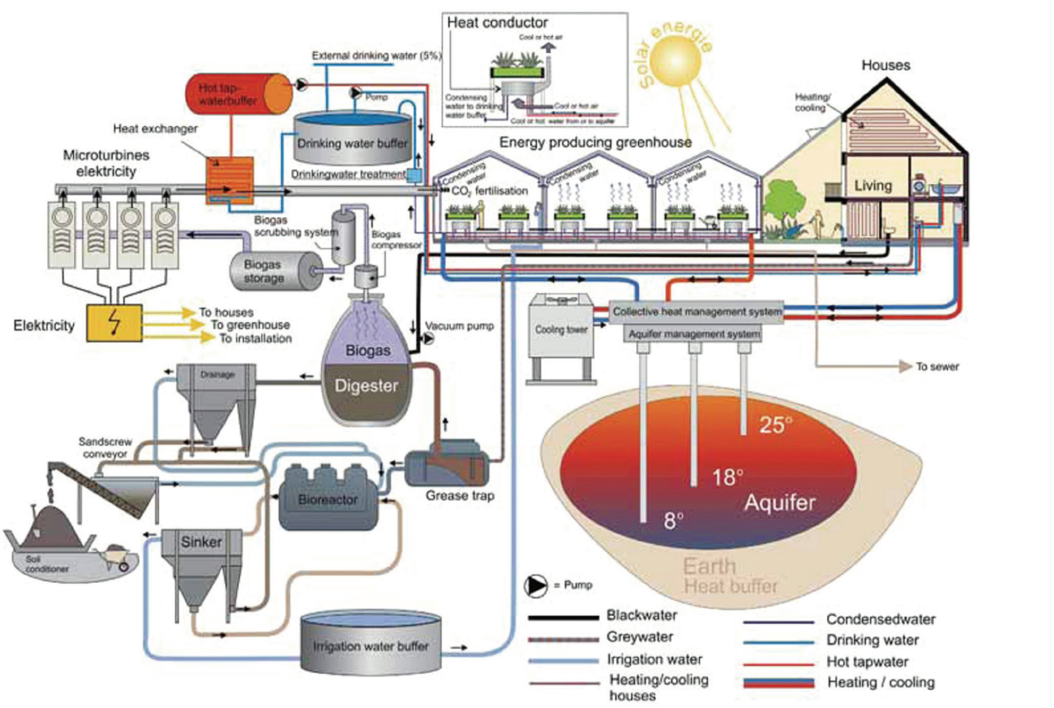


圖8. 溫室村之技術布局(Andel et al., 2007）。

試圖結合溫室生產與電力生產以取代溫水生產，Sonneveld et al. (2006)設計一具有拋物線 NIR 反射溫室覆蓋的系統。這種覆蓋反射並且使 NIR 輻射聚焦在一特定 PV 電池或太陽能收集器上以產生電力(圖 9)。在實際 100 m^2 原型測量的最先結果顯示此系統所產生電與熱能的潛能可能達到 15 kWh/m^2 的電與大約 50 kWh/m^2 的熱能。但是，目前由於能源當今價格水準、作物生產的有限增加，以及所需複雜與昂貴的裝置，完全密閉溫室的大多數系統和概念並非具有經濟性競爭力，而且只能以從地方與國家政府的特定支援而實現。

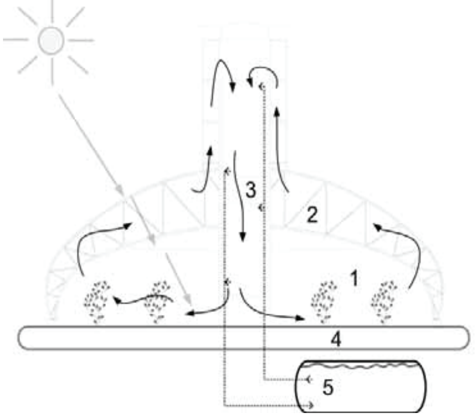
對世界上半乾旱地區來說，就合併高水準技術並打算採用密閉或半密閉溫室概念之創新與具能源效益的溫室而言，某些有趣的設計已經實現。如圖 10 所示，在 Watergy 計畫內，一完全密閉溫室被發展，其係基於創新的熱交換器，並追求水的完全再循環((Buchholz et al., 2005)。此真實雛型顯現大有可為的結果，但是此完全密閉溫室之經濟可行性如同北方緯度地區一樣仍是主要瓶頸。

世界上加熱可能是方便但基本上並不需要的大部分地區，發展具能源效益溫室系統的主要途徑仍是基於被動式溫室(passive greenhouses)的發展。由於此種處境下，氣候調控的能量輸入非常有限，在被動式溫室的操

作中減少其他牽涉 CO_2 排放的過程被加以考慮。生命週期分析(Life Cycle Analysis)被用於整個生產過程以確認那些組件是能源消耗較多的。對於不加熱的溫室，溫室結構(基礎和圍牆)以及輔助設備(灌溉管、覆蓋塑膠與作物支持組件)占總氣體排放的 51%。新設計集中於基礎系統的重新設計與可回收利用混凝土的使用以降低能源使用。由於肥化生產與使用是番茄生產能源消耗(大約排放的 36%)強大影響的另一因素，更被動溫室的總能量效率可以削減肥化而達成。

圖9. 使用反射NIR供電力生產之電力產製溫室雛型。

在西班牙Almeria剛完成結構的WATERGY溫室



白天期間溫室內空氣與水分之移動

圖10. WATERGY溫室(Speetjens et al, 2005)。

四、 世界節能政策趨勢

(一) 荷蘭節能政策與「綠標溫室」(Nederhoff, 2004)

荷蘭具有嚴厲的環境法律以調節能源使用、農藥使用與營養(肥料)排放，這些方案農民雖害怕，但荷蘭政府對於能完成者(good achievers)亦提供若干獎勵，例如補助、稅率抵減、投資支持與降低利率。

1. 荷蘭政府節能政策之規定

2002 年 1 月 1 日開始，荷蘭對面積超過 2500 m^2 的溫室實施新法則 AMvB (Besluit Glastuinbouw)，其主要是基於三項其他法律並合併 1997 年產業與政府間簽訂的公約，法則定義種植者被允許使用有關能源、營養與農藥的數量，每位種植者必須負責達成個人目標，其溫室產業 2010 年之總目標為：

(1) 相較於 1980 年，能源效率提升 65%。

(2) 永續能源之貢獻增加 4%。

(3) 相較於 1984-1988 年，農藥使用減少 88%。

(4) 相較於 1980 年，磷與硝酸鹽肥料之釋放減少 95%。

2. 記錄與報告義務

此法律(AMvB)要求種植者做許多記錄與報告，生產計劃並於每年 11 月前開始。此計劃告訴種植者可施用多少能源、肥料與農藥，為達成 2010 年之目標，其數量每年均減少。每位種植者必需將記錄保留至少 5 年，其焦點集中在記錄簿、年度報告(每個種植者在 5 月 1 日前提

送)與包括所有文件的環境資料，可以理解的是，強制記錄與報告對種植者而言是相當大的負擔。

3. 其他方案與「綠標溫室」

目前種植者有許多系統可以使用於環境與能源議題的強制記錄與報告，也有其他系統可協助計算與執行行政作業。所謂「綠標溫室」，是規劃新溫室或更新既有溫室時環境書面作業的行政工具。綠色標章協助向政府展示新溫室將是環境友善、具能源效率，也包括植物營養與作物保護。如果規劃符合標準要求，種植者會收到綠標溫室的綠色標籤憑證(簡稱綠標憑證)，並可申請獎勵。

4. 要求

就溫室而言，綠標方案定義兩項要點，即需符合之基本要求，與種植者可獲得點數的投資選項。基本要求規定結構件、牆、屋頂與檐槽(gutter)之細節，大量加熱溫室(heavy-heated greenhouses)之其他基本強制要求，包括具溫度、濕度與二氧化碳精準感測器之氣候控制電腦，加熱也須完成詳細之準則，而且必須有若干生物控制。有趣的是，使用由鍋爐而來廢氣中之二氧化碳也是強制的。此外，種植者也可選擇可獲得點數的投資選項(包括用水量、能源消耗量、營養成分、農藥使用量和光污染五方面，種植者可聚焦於一或數個方面)，亦即裝設例如保溫網、冷凝器、鍋爐或管線上之絕緣體、熱緩衝桶與外部來源之廢熱等節能設備。每一選項給予一些獎勵點數。對番茄溫室而言可以獲得綠標憑證之點數數值為 110；其他大量加熱溫室則為 100；而具輕加熱或熱氣加熱之溫室則為 85。達到申請“門檻”者可得到“綠色標籤”，並被納入為期 10 年之評估監督期，其評估結果有三，分別為同意延長(最佳)、限期改正與摘牌(最糟糕，亦即收回“綠色標籤”)。

5. 獎勵

如果獲得足夠點數，亦即計畫投資已足夠，種植者就會獲得溫室之綠標憑證，此給種植者例如 MIA、VAMIL 與綠色投資等獎勵之權利。MIA 是給投資環境友善生產設備之稅金扣除；VAMIL 提供資金流動與利率之商業利益；綠色投資幫助環境友善之投資。這些獎勵被認為非常值得，顯然地也有未達成所設定目標之處罰，種植者也可能不使用綠標溫室方案而直接申請減稅獎勵，但這樣他必須自己做研究與文書作業。綜觀荷蘭綠標溫室制度之實施，效果卓著，主要在於溫室種植業之能耗大大降低、技術創新方興未艾，以及循環再利用得到推廣。

(二) 荷蘭的能源稅與 CO_2 排放權(Nederhoff, 2006)

在荷蘭溫室加熱通常使用天然氣，其燃燒產生 CO_2 與氧化氮(NOx)，據信此兩“溫室氣體”導致全球暖化。荷蘭保證相較於 1990 年，2008-2012 年期間會減少 6%溫室氣體的排放。荷蘭溫室種植者依法需申請排放 CO_2 與氧化氮，以及完整記錄這些氣體排放的許可證。至目前為止已有一系統(GLAMI)，憑此種植者必須保持他們的能源使用在某最高限度下。每種作物都訂定其最高限度值，每年並以某百分比降低，此系統將逐漸由歐洲方法(CO_2 排放權交易)取代。在荷蘭 CO_2 交易的第一階段於 2006 年 1 月 1 日開始，主要牽涉非常大的能源用戶，但是相當數目之種植者在 2008 開始之第二階段加入。好消息是溫室種植者從他們的努力中獲得某些回報，他們支付降低稅率的貨品及服務稅(GST, Goods and Services Tax)，以及降低之天然氣能源稅。而且，他們可以申請節能技術與使用永續能源的補貼與稅款獎勵。

1. 能源稅

荷蘭天然氣的價格由至少 4 個部分組成：天然氣成本、分配成本、能源稅與貨品及服務稅，“尖峰”需求與總需求也影響價格。由於供應者間之競爭激烈，天然氣價格變動很大。Nederhoff (2006)指出能源稅被具體指定從非常小至極大用戶等 5 個類別(表 2)，此處數據是以十億焦耳(Giga Joule)與紐西蘭元表示(從歐元和 m^3 天然氣轉換而來)。第一類(大約少於 175 GJ/year)是非常小的種植者或很少使用溫室加熱者，他們只支付其他工業所必須付能源稅的 10%，亦即每十億焦耳 0.71 至 1.07 紐西蘭元。對中型的溫室來說能源稅是每十億焦耳 0.88 紐西蘭元。極大的溫室組合將進到最後類別(每十億焦耳 0.40 紐西蘭元)，由於他們的操作規模這些種植者可能最先參加 CO_2 排放權交易。

表2. 2006年荷蘭的天然氣能源稅(Nederhoff, 2006)

天然氣消耗 每年十億焦耳(GJ)	一般工業 紐西蘭元/ GJ	溫室產業 紐西蘭元/ GJ	在紐西蘭具對應天然氣消耗 之溫室規模
少於 175	7.75	0.71	非常小，或沒有管線加熱
175-6,000	6.37	1.07	在紐西蘭多達0.4 ha
6,000 - 35,000	1.75	0.88	中型，在紐西蘭0.4 - 2.5 ha
35,000 - 350,000	0.60	0.60	在紐西蘭2.5 - 25 ha
多於350,000	0.40	0.40	極大，在紐西蘭多於25 ha

2. 排放權

能源稅是一種手段，但歐洲國家同意做更多以降低“溫室氣體”的排放，包括 CO_2、甲烷、氧化氮與氧化亞氮氣體。原則上是為限制排放溫室氣體的權利，並且發行可以被交易的“排放權”。例如，CO_2 排放交易是允許 CO_2 排放的買或賣之權利。在荷蘭 CO_2 排放交易的第 1 階段自 2006 年 1 月 1 日開始。對於大工業，NOx 排放交易自 2005 年中開始，其他氣體也被跟隨採行。該計畫被納入歐洲規章，並且很可能其他歐洲國家也會執行，歐盟已針對溫室氣體排放權交易訂定體制與規章。

3. CO_2 排放權交易

幾年前歐洲國家同意每個國家可以排放多少 CO_2，並且分配 CO_2 排放權給每個國家。政府任命“排放管理機構(Emission Authority)”分配他們國家內的排放權。經過強烈討論後，某分配計畫在荷蘭被建立，並且由“歐洲”批准，此分配計畫 2004 年首次宣佈，並於 2005 年修訂，且具有約束力。CO_2 排放權交易的最先參加者是真正的大工業，某些異常大的溫室企業也具備資格。荷蘭政府從歐洲獲得許可讓較小與中型能源用戶(溫室種植者)直到 2008 年 1 月 1 日第二階段才開始。此乃因登記、監控與報告的費用對於較小公司是不成比例的，但在兩年後將會更好。在 2008 至 2012 年 CO_2 排放權交易的第二階段，預計會有 50 至 80 處較大溫室會被納入。

4. 對種植者而言排放權交易如何運作

每年一開始，種植者會從排放管理機構得到 CO_2 排放權，此權利是寫在正式權利登記中。在年底種植者必須準確報告他已經使用多少能源，以及他已經排放多少 CO_2，這份報告必須由獨立稽核員加以證實。種植者必須有足夠的權利以涵括排放的 CO_2 數量。在一年的過程中，如果他認為他需要更多，種植者可以買更多的權利，或者如果他希望也可出售權利。不僅參加的種植者與工業可以交易排放權，其他公司與個人也可以。交易是透過某種股票市場、銀行或中間人完成，每個交易者就他們的權利需要一個帳戶。

5. 稅捐獎勵與其他好處

可理解的是目前能源稅被厭惡，未來的 CO_2 排放權交易系統被視為巨大負擔。此事的正向面是荷蘭種植者得到在節能技術投資上的顯著補貼與稅捐返還。這是政府可以繼續控制荷蘭溫室產業未來發展的模式，也總是與產業合作完成。他們認可一符合資格給予支援的技術清單，並且每年更新此清單，例如鼓勵永續能源的使用與共生發電機的實現，結果很多溫室種植者現在都有共生發電機(CHP＝ 熱電聯合系統)，

並且輸送電力至電力網絡。用於共生發電機的天然氣並沒被課徵能源稅，而輸送至電力網絡的電力則產生報酬(remuneration)。稅捐獎勵與補貼也強烈激勵了其他發展，包括工業或電廠餘熱能源的使用、相同來源的大量 CO_2、聚落、生質燃料的先導計畫、在較深土壤的熱儲存、密閉溫室，以及更多其他相關。此外也有例如研究與建議的服務可提供種植者能源議題的幫助，其經常是需要費用，但是有時是部分或間接補助。

(三) 紐西蘭溫室種植者的碳稅費用(Nederhoff, 2005)

1. 碳稅

據 Nederhoff (2005)報導紐西蘭政府打算從 2007 年 4 月 1 日導入碳稅，並計算有關各種燃料必需花費的碳稅，對排放 CO_2 的所有礦物燃料，包括煤、天然氣、柴油、汽油和重油都將收費，碳稅最初將訂在每公噸 15 紐西蘭元，並且將只在國際市場上排放單位價格實質變動偏離此設定值時才被調整，2008-2012 期間其最大限定值將被訂在每公噸 CO_2 25 紐西蘭元。

2. 每能源單位或體積的碳稅

各種燃料碳稅的計算是基於它們的熱能含量與碳含量(技術資料取自紐西蘭能源資料手冊(By J.T. Baines，ISBN 0-473-01662-1)，其中需要某些轉換，例如，煤是以重量(公斤或公噸)量測，而且其熱能含量經常以英國熱量單位(British Thermal Units, BTU)表示。油與天然氣是以體積(公升與 m^3)量測，而且其熱能含量以焦耳(J)、百萬焦耳(MJ)、十億焦耳(GJ)或千瓦小時(kWh)表示。

碳稅被假設在每公噸 CO_2 排放 15 紐西蘭元的稅率，如果被定在不同的水準，數值必需調整。例如若碳稅被訂在 10 紐西蘭元，那麼所有數值將降低 1/3；而若訂在每公噸 CO_2 25 紐西蘭元，那麼所有數值將提高 2/3。

3. 每公頃碳稅

為了將這些數值賦予意義，Nederhoff (2005)計算每公頃溫室之碳稅費用，假設各種能源的投入介於 500 與 2500 $MJ/m^2/year$ 之間(這等於 5,000 至 25,000 GJ/ha/year)。代表很多種植者的良好指標是 1500 $MJ/m^2/year$，此數值於表 3 中使用，表中也顯示多少公噸煤或多少 m^3 天然氣體等於 1500 MJ/ $m^2/year$。2000 $MJ/m^2/year$ 或更多的能源使用對於密集加熱不是奇特的，然而接近 1000 $MJ/m^2/year$ 的能源使用對於較少密集加熱的種植者而言也是可能的。而 500 $MJ/m^2/year$ 非常低的能源使用只適用於冬天不加熱的溫室。

表3. 在1500 MJ/ m^2/year能源使用下之燃料使用量、CO_2排放量與碳稅 (Nederhoff, 2005)

燃料	燃料使用量	CO_2 排放 (Kg $CO_2/m^2/y$)	碳稅 ($/$m^2$/y)
煤，含瀝青	46.7 kg/m^2/y	133	2.00
煤，含次級瀝青	66.4 kg/m^2/y	137	2.05
煤，所有褐煤	100.0 kg/m^2/y	143	2.14
煤，所有 NZ 生產	59.8 kg/m^2/y	136	2.03
燃料油-輕	37.2 liter/ m^2/y 33.7 kg/m^2/y	109	1.63
燃料油-重	36.8 liter/ m^2/y 34.8 kg/m^2/y	112	1.68
柴油	39.2 liter/ m^2/y 32.8 kg/m^2/y	103	1.55
丙烷	29.8 kg/m^2/y 58.6 liter/ m^2/y	89	1.34
丁烷	30.3 kg/m^2/y 52.8 liter/ m^2/y	92	1.38
液化石油氣(LPG)	30.0 kg/m^2/y 56.6 liter/ m^2/y	91	1.36
天然氣	38.5 m^3/ m^2/y 416.7 kWh/ m^2/y	79	1.19

表 4 顯示各種燃料之碳稅範圍每十億焦耳能量從 0.79 紐西蘭元至 1.43 紐西蘭元，或每 1000 千瓦小時(1000 kWh 或 1 MWh)能量從 2.85 紐西蘭元至 5.14 紐西蘭元。與燃料重量有關，其範圍從每公噸燃料 21 紐西蘭元至 48 紐西蘭元。天然氣並非以公噸量測，而是 m^3 或 GJ。就平均能源消耗 1500 MJ/ m^2/year 的溫室而言，每公頃碳稅範圍由少於 12,000 紐西蘭元至超過 21,000 紐西蘭元。

顯而易見的是，碳稅將加在“正常”能源價格之上，而檢視碳稅所引起價格增加的百分比會是有趣的，大部分情況其顯然在現今價格的 10 至 30%範圍。尤其注意附加相當高碳稅的燃料，例如煤，通常具有相當低的“正常”價格，因此其總價可能較別種具有低碳稅燃料的價格低。由於有不同類型的煤、天然氣與油等，特殊情況的碳稅費用可能與表中所顯示者有點不同。

五、溫室節能措施

在北方地區(加拿大、英國、荷蘭等)加熱與冷卻溫室之成本可能達總操作成本的 70 至 85%，而在較溫暖的地區(美國西南方、墨西哥、西班牙、以色列等)其成本仍佔總操作成本的 50%。因此，顯見加熱與冷卻是溫室操作預算之顯著部分。降低加熱與冷卻需求之任何措施也將降低這些費用，並且將因此增加利潤(Rorabaugh, 2002)。溫室操作者可以做某些事情以降低能源消耗，因此改進能源效率，一般從最容易達成、可以獲得最好結果，或最便宜的行動開始，其取決於各種情況。

表 4. 各種燃料的主要特性與碳稅(Nederhoff, 2005)

不同燃料的主要特徵						稅率每噸 CO_2\$15 之碳稅		
燃料	單位	碳含量 (%)	能量含量	CO_2 排放 ($kgCO_2$/kg 燃料)	CO_2 排放 (kg/GJ)	碳稅 (\$/GJ)	碳稅 (\$/MWh)	碳稅 (\$/tone 燃料)
煤，含瀝青	kg	78	32.1 MJ/kg	2.86	88.8	1.33	4.80	42.84
煤，含次級瀝青	kg	56	22.6 MJ/kg	2.06	91.2	1.37	4.93	30.96
煤，所有褐煤	kg	39	15.0 MJ/kg	1.43	95.2	1.43	5.14	21.45
煤，所有 NZ 生產	kg	62	25.1 MJ/kg	2.27	90.4	1.36	4.88	34.09
燃料油-輕	liter		40.3 MJ/liter		72.5	1.09	3.92	
	kg	88	44.5 MJ/kg	3.23				48.39
燃料油-重	liter		40.8 MJ/liter		74.8	1.12	4.04	
	kg	88	43.1 MJ/kg	3.23				48.39
柴油	liter	86	38.3 MJ/liter		68.7	1.03	3.71	
	kg	86	45.8 MJ/kg	3.15				47.29
丙烷	kg	82	50.4 MJ/kg	3.01	59.6	0.89	3.22	45.09
	liter		25.6 MJ/liter					
丁烷	kg	83	49.5 MJ/kg	3.04	61.4	0.92	3.32	45.64
	liter		28.4 MJ/liter					
液化石油氣 (LPG)	kg	82	50.0 MJ/kg	3.02	60.4	0.91	3.26	45.31
	liter		26.5 MJ/liter					
天然氣	m^3	68	39.0 MJ/m^3		52.8	0.79	2.85	
	kWh		3.6 MJ/kWh					

Nederhoff與Houter(2006)歸類溫室加溫方面之節能措施如下：

(一) 提升能源效率(透過降低能源投入與/或在沒有增加能源使用下增加產量)

這可以廣泛之措施達成，包括品種選擇、好的繁殖、植物管理、生產系統、給水、施肥、氣候控制與 CO_2 增添等，而作物記錄也是改進生產的工具。

(二) 修理損壞的設施或用具

設施的損壞可能造成冷與潮濕的地點，具 1℃較低溫度的地方會有 5%之較高相對濕度，而在此種位置的植物生長落後並且容易爆發疾病。

(三) 設備與感測器的維修與服務

髒的鍋爐可能有 5-10%的較低效率，其意味著增加 5-10%不必要的燃料成本。測量空氣濕度之濕球溫度感測器，必須保持潮濕，如果芯布(wick)是乾燥的，空氣濕度的讀值將太高，甚至達 100%。控制器於是透過啟動加熱與/或排氣而努力克服此被誤認的高濕度，因此花費能源。

(四) 進行升級

舊鍋爐可以現代有效率的鍋爐加以替換，並且可能短時間內回本。熱空氣加熱可以升級至熱水管加熱，可立即增加生產並降低疾病問題。安置在溫室高處的加熱管，可以降低下來。將熱傳遞至需要的地方是較有效率的，亦即接近植物，而不是接近屋頂的地方。在土壤裡生長可以改變成水耕生長，其導致較佳的生產與較好的控制能力。

(五) 絕緣溫室

溫室透過屋頂與牆而損失熱量。就雙層塑膠被覆而言，能量損失比單層塑膠或單層玻璃少，但是光的傳送也較低。

(六) 絕緣加熱設備

第一優先應該先將外面的管路作包覆(legging)處理；第二優先應該將從鍋爐來的熱水輸送管作包覆處理；第三優先是絕緣溫室內之熱水輸送管。由於在溫室內部損失熱量並不像在外面那麼糟，但熱的管路導致溫度不均，會使得植物生長參差不齊。

(七) 安置節能技術

調節天然氣控制閥、燃煤供應的變速螺旋、加熱系統的變速幫浦、煙氣凝結器(僅限燃氣輪機)、熱儲存桶(/緩衝桶)與保溫網(/熱力網)等。

(八) 透過電腦實施智慧能源(energy-wise)的氣候控制

溫度累積是先進溫室管理溫度的一種方法，其主要是大多數成熟植物不需要一直維持精確的溫度，他們能在短時期內接受較低溫度，只要稍後有較高溫度予以補償即可。因此當加熱費用昂貴時，加熱可往較低溫調整。

在沒有生產損失下，此種溫度控制方式可節省 5-10%的加熱成本。

(九) 避免溫度梯度

(十) 改變至其它能源

可使用來自電廠或其他熱源的熱。在某些地方可以選擇地熱的熱能，以及利用來自土壤或地下的低溫熱能。

(十一)安裝共生發電機(電熱綜合系統)

共生發電機是靠天然氣或油的引擎產生熱與電，此熱可用於溫室加熱，而電可使用供幫浦或其它地方，或可被出售。此種共生發電加熱節省成本 16-18%。

(十二)增進知識

(十三)記錄與分析氣候數據

記錄能源消耗並使其與氣候狀況相結合，可幫助理解能量需求，尤其計算能源效率(每單位能源的產出)是有用的，不做任何投資下光記錄本身可導致 5%的能源節省。透過比較自己擁有的數據與參考數據，種植者可決定是否有節能的行動需求。

(十四)更換非常舊的溫室

陳(2010)報告農業生產運用高效節能科技趨勢論壇中，台大方煒教授提出溫室節能策略如下：

(一) 溫室挑高設計，當溫室高達 6～7 公尺時，使用遮陽網搭配自然通風，可以不使用風扇與水牆。

(二) 連棟與大規模溫室設計，相同面積下連棟溫室比多間單棟溫室節能，規模放大也比較節能。

(三) 重視溫室之保溫、隔熱與氣密性。

(四) 使用保溫膜，可縮小加溫與降溫所需之空氣體積。

(五) 寒流期間於夜間拉上遮陽網，可減少夜間輻射冷卻而導致熱能的散逸。

(六) 溫室的加、降溫設備應接近植物所在的區域。

(七) 考量植物的生理生長，並提高育成良率。

(八) 以熱泵系統取代鍋爐，在使用正確的取熱設計、主機及供暖設計下，耗用 2 度電所產生的熱能約等於鍋爐燃燒 1 公升柴油或重油。

(九) 進行雨水與冷凝水的回收。

(十) 改用發光二極體進行人工補光。

(十一) 考量太陽能與電能的再利用，利用太陽能發電供應幫浦打水進行吸收太陽熱能。

(十二) 利用水的三相變化，結合相變材料的儲熱能力，使用自然能源。

(十三) 零耗能溫室，利用地下儲存夏（冬）季熱（冷）能供冬（夏）季使用。

六、 國內展望

(一) 技術方面.

綜觀溫室節能技術之回顧，具能源效益溫室的設計包括溫室(當成太陽收集器)的最佳化、透過生長環境的較佳控制以提升生產，以及延伸生長季節。對溫和的氣候來說，有潛力的方式是具有冷卻、熱回收與最佳化環境控制的氣密溫室。對乾旱的狀況來說，主要步驟是有效率的自然通風、冷卻，並且在夏天降低進入溫室的太陽能流。而對於一點也不使用礦物燃料的被動式溫室，節能步驟可以藉降低溫室結構、灌溉、輔助設備與例如肥化等能量輸入而做到。除了能源使用的減少外，欲達成具能源效益生產溫室之目標，不同礦物燃料的替代選項(例如廢熱與太陽能)的使用是必要的。不過，所有新設計的實際應用取決於經濟可行性，其導致世界上不同地區的不同解決方案。

而就國內狀況而言，尤其必須注重溫室降溫，若干研究缺口臚列如下：

1. 具白天期間反射 NIR 而夜間反射 FIR 特性被覆材料之開發或應用。
2. 降低與濕度控制有關能源消耗之研究(較高的濕度設定點、降低作物的蒸散位準，或以回收熱除濕)。
3. 具能源效益的操作控制(例如溫度累積)之研究應用。
4. 具能源效益作物生產與品質控制(作物控制)之研究(不再是追求環境因子或像加熱、通風與 CO_2 供應等作動器之控制)。
5. 利用海洋深層水冷度的“低冷農業技術”。
6. 地對空氣熱交換器系統之應用研究。
7. 研究溫室設計、不同形狀溫室微氣候變化與驅動自然通風相關物理過程，以預測溫室中空氣交換率而達最佳環境控制。
8. 研究浮力與風驅動之通風如何受通風器構造、溫室尺寸與幾何等影響。
9. 理解與預測溫室內光分佈樣式之研究。
10. 研發考慮覆蓋特性、通風與作物蒸散的綜合電腦模式，以描述並掌控溫室的微氣候。
11. 開發適合潮濕熱帶與亞熱帶氣候之降溫系統。
12. 發展熱帶與亞熱帶自動化溫室，並提升自動化控制程度。

(二) 政策方面

儘管碳稅與 CO_2 排放權似乎離我們仍遠，但如果有一天「碳稅」成為事實，我們準備好了嗎？由荷蘭「綠標溫室」的方法中學到的概念(Nederhoff,

2004)或許對我們也有很大助益，下列概念可考慮納入未來之節能政策規劃：

1. 國內溫室農業與能源耗用之基本資料亟待建立。
2. 節能目標在於提升能源效率而非減低能源消耗：整個產業之能源消耗並非可感知的指標，因為隨著年度過往產業可能成長或縮減，因此能源評量選項可與面積有關而以 $MJ/m^2/year$ 表示，而且其與產量($kg/m^2/year$)相較也有意義，更好的是考慮能源與產量之比值，亦即能源效率，以 MJ/kg 或 kg/MJ 表示。
3. 進行資料記錄與基準評量(benchmarking)是有利產業發展的：產業可能想要示範能源使用(或能源效率)之改善，這需要資料，而改善只能以比較現有資料與之前資料而展現，因此產業現在必須開始記錄能源與生產之資料，並用作未來之基準(benchmark)，這當中使用標準化方法與準備好可用基本資料是重要的。
4. 考量推動獎勵制度：當最後有獎勵時人們總是較容易受激勵而奮鬥，過去這些年來荷蘭政府已實施許多嚴厲法律，通常伴隨稅金之獎勵，這些乃因為達成目標而獲得之獎勵，而牽涉獎勵方案之金錢通常來自同一產業之徵收(levies)與稅金，其結果是產業整體進步，而且產業目標也達成。

七、結　　語

當世界各國正努力降低碳排放與全球暖化時，降低能源消耗變成必然趨勢。在高緯度國家溫室控制燃料消耗的主要部分在於加熱，以便控制溫度和濕度，而在台灣溫室降溫反成為主要訴求。本文主要目的在於綜合回顧世界上主要可得溫室節能技術與系統研發，並且討論其代表性應用，除提供溫室節能的基本、技術、政策與節能措施等供參考外，並導引出值得國內深入研發與發展的可能缺口。可以歸結的是目前並無十全十美的可得技術，可符合溫室與內部作物所有節能需求。系統的選擇與操作係基於像氣候類型、種植作物、花費、維修、操作容易性、系統可靠性、系統壽命等各種參數。因此，溫室節能最適合技術應該可以符合種植者大部分需求狀況，並且在沒有增加能源使用下增加作物產出以取得最大回收。

參考文獻

1. 陳昌岑。2010。農業生產運用高效節能科技趨勢論壇紀實 (下)。臺灣花卉園藝。270: 32-34。
2. Adams, S.R., Woodward, G.C. and Valdes, V.M. 2002. The effects of leaf

removal and of modifying temperature set-points with solar radiation on tomato. J. Hort. Sci. Biotech. 77:733-738.

3. Agririou, A., Santamouris, M., Asimakopoulos, D.N., 1996. In: James and James, (Eds.), Ground Passive Cooling in Buildings, London, pp. 360–393.
4. Andel, N. van, E. van Andel, A. Ter Beek, E. Wortmann, J. Kristinsson, A. Mels, G. Zwwman, J. de Wilt and P. Oei. 2007. Greenhouse village, the greenhouse-powered neighborhood. Flyer of Innovation Network, Reinventing Agribusiness and Rural Areas, Ministry of Agriculture and Environment, The Netherlands.
5. Bailey, B.J. 1985. Wind dependent control of greenhouse temperature. Acta Hort. 174:381-386.
6. Bakker, J. C., 2009. Energy saving greenhouses. Chronica Horticulturae 49(2): 19-23.
7. Bot, G., N. van de Braak, H. Challa, S. Hemming, Th. Rieswijk, G.v. Straten and I. Verlodt. 2005. The solar greenhouse: state of the art in energy saving and sustainable energy supply. Acta Hort. 691: 501-508.
8. Buchholz, M., P. Jochum and G. Zaragoza. 2005. Concept for water, heat and food supply from a closed greenhouse. The WATERGY project. Acta Hort. 691: 509-516.
9. Campen, J.B. and Bot, G.P.A. 2002. Dehumidification in greenhouses by condensation on finned pipes. Biosyst. Eng. 82(2):177-185.
10. Challa, H. and van de Vooren, J. 1980. A strategy for climate control in greenhouses in early winter production. Acta Hort. 106:159-164.
11. Dieleman, A. and Kempkes, F. 2006. Energy screens in tomato: Determining the optimal opening strategy. Acta Hort. 718:599-606.
12. Djevic, Milan and Aleksandra Dimitrijevic. 2004. Greenhouse Energy Consumption and Energy Efficiency. Conference Proceedings of Energy Efficiency. http://www.ru.acad.bg/baer/BugGHRad.pdf.
13. Enoch, H. Z. 1977. A theory for optimalization of primary production in protected cultivation, I Influence of aerial environment upon primary plant production, Symposium on More Profitable use of Energy in Protected Cultivation, Sweden.
14. Ghosal, M.K., Tiwari, G.N., 2006. Modeling and parametric studies for thermal performance of an earth to air heat exchanger integrated with a greenhouse. Energy Conversion and Management 47 (13–14), 1779–1798.
15. Ghosal, M.K., Tiwari, G.N., Sirivastava, N.S.L., 2004. Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation. Energy and Buildings 36 (3), 221–227.

16. Hemming, S., Kempkes, F., Van der Braak, N., Dueck, T. and Marissen, N. 2006. Filtering natural light at the greenhouse covering – Better greenhouse climate and higher production by filtering out NIR? Acta Hort. 711:411-416.
17. Korner, O. 2003. Crop based climate regimes for energy saving in greenhouse cultivation. PhD Thesis, Wageningen Univ., The Netherlands.
18. Kumar, K.S., K.N. Tiwari, M. K. Jha. 2009. Design and technology for greenhouse cooling in tropical and subtropical regions: A review. Energy and Buildings, 41: 1269–1275.
19. Kumar, R., Ramesh, S., Kaushik, S.C., 2003. Performance evaluation and energy conservation potential of earth–air–tunnel system coupled with non-air-conditioned building. Building and Environment 38 (6), 807–813.
20. Levit, H.J., Gaspar, R., Piacentini, R.D., 1989. Simulation of greenhouse microclimate by earth-tube-heat-exchangers. Agriculture and Forest Meteorology 47, 31–47.
21. Mihalakakou, G., Santamouris, M., Asimakopoulos, D., Papanikolaou, N., 1994. Impact of ground cover on the efficiencies of earth-to-air heat exchangers. Applied Energy 48 (1), 19–32.
22. Nederhoff, E. 2004. 'Green label greenhouse' and energy-saving policies in the Netherlands. Grower 59(10): 38-40.
23. Nederhoff, E. 2005. The costs of carbon tax for greenhouse growers. Grower 60(7): 37-38.
24. Nederhoff, E. 2006. Energy tax and CO_2 emission rights in the Netherlands. Grower 61(2): 36-38.
25. Nederhoff, E. & B. Houter. 2006. Potential energy saving measures categorised. Grower 61(5): 35-36.
26. Opdam, J.J.G., Schoonderbeek, G.G., Heller, E.B.M. and de Gelder, A. 2005. Closed greenhouse: a starting point for sustainable entrepreneurship in horticulture. Acta Hort. 691:517-524.
27. Pereira, G. P. 2002. Haiti waiting for its deep ocean water systems or "fountains of paradise." Tenth PACON International Congress on marine science and technology. Chiba, Japan.
28. Rorabaugh, P., M. Jensen, and G. Giacomelli. 2002. Greenhouse energy conservation and alternatives. University of Arizona. Reprinted from Chapter 13 in: Introduction to Controlled Environment Agriculture and Hydroponics.
29. Santamouris, M., Balaras, C.A., Dascalaki, E., Vallindras, M., 1994. Passive solar agricultural greenhouses: a worldwide classification and evaluation of technologies and systems used for heating purposes. Solar Energy 53 (5), 411–426.

30. Santamouris, M., Mihalakakou, G., Balaras, C.A., Argiriou, A., Asimakopoulos, D., Vallindras, M., 1995a. On the performance of buildings coupled with earth-to-air-heat-exchangers. Solar Energy 54, 375–380.
31. Santamouris, M., Mihalakakou, G., Balaras, C.A., Argiriou, A., Asimakopoulos, D., Vallindras, M., 1995b. Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agricultural greenhouses. Solar Energy 55 (2), 111–124.
32. Schiller, G., 1992. Earth tubes for passive cooling, the development of a transient numerical model for predicting the performance of earth/air heat exchangers. M.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Boston, MA.
33. Sethi, V.P. and S.K.Sharma. 2007a. Experimental and economic study of a greenhouse thermal control system using aquifer water. Energy Conversion and Management 48 (1), 306–319.
34. Sethi, V.P. and S.K.Sharma. 2007b. Thermal modeling of a greenhouse integrated to an aquifer coupled cavity flow heat exchanger system. Solar Energy Journal 81 (6), 723–741.
35. Sethi, V.P. and S.K. Sharma. 2007c. Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications. Solar Energy 81: 1447–1459.
36. Sonneveld, P.J. and G.L.A.M. Swinkels. 2005. New Developments of Energy-saving Greenhouses with a High Light Transmittance. Acta Hort. 691:589-596.
37. Sonneveld, P.J., Swinkels, G.L.A.M., Kempkes, F., Campen, J.B. and Bot, G.P.A. 2006. Greenhouse with integrated NIR filter and a solar cooling system. Acta Hort. 719:123-130.
38. Speetjens, S.L., T. van der Walle, G. van Straten, J.D. Stigter, H.J.J. Janssen, Th.H. Gieling. 2005. WATERGY, towards a closed greenhouse in semi-arid regions: experiment with a heat exchanger, Acta Hort. 691: 845 - 852.

低耗能人工光源與高效能熱泵技術在農業之應用研發

方煒

國立台灣大學生物產業機電工程學系 教授

摘　要

本文旨在介紹低耗能人工光源與高效能熱泵技術在農業的應用與研發，首先分別介紹兩者各自的應用領域，包括發光二極體在植物生產的應用與雙效熱泵在諸多領域的可行應用範疇。其次介紹兩者在植物工廠領域的整合應用，並釐清一些被誤導的迷思。最後針對不同氮源、碳源與能源系統之整合應用提出設計。

一、 低耗能人工光源在農業的應用與研發

長久以來在農業生產上，螢光燈管與高壓鈉燈是最主要也最普遍的人工光源。如何補光、提高補光均勻度、調整光質與研發更高效率的人工光源一直是學界研究的重點。近年來光電技術的進步大幅提昇了發光二極體 (LED) 的亮度與效率，又因量產、競爭與達成投資回收所造成價格的降低，LED 取代日光燈光源應用在量產規模的組培苗栽培及作物栽培的日子已經來臨。

發光二極體具有高光電轉換效率、使用直流電、體積小、壽命長、波長固定與低發熱等幾項優點，相較於目前使用螢光燈或高壓鈉燈為人工光源的系統而言具有光量可調整、光質 (紅/藍光比例或紅/遠紅光比例) 可調整、冷卻負荷低與允許提高單位面積栽培量等優點，因此對封閉有環控的農業生產環境 (如植物組織培養室、植物生長箱等) 是一種非常適合的人工光源。

在 1990 年代初期，美國太空總署首創 LED 應用於太空農業上， 迄今 LED 已經被應用於許多植物光生理領域的研究或植物栽培上，例如藻類培養生物反應器、葉綠素生合成研究、光型態發生及光合作用等研究上。在作物種類上許多作物或花卉已經被證實可成功的應用 LED 來栽培，包括有：萵苣、胡椒、胡瓜、小麥、菠菜、虎頭蘭、草莓、馬鈴薯、蝴蝶蘭、白鶴芋及藻類 (方與饒，2004；方與林，2005; 方，2006)。其中，在藻類栽培上證實只需要紅光 LED 即可，但是對其他植物而言，除紅光外，藍光與遠紅光光量大小同時會影響生長及型態發生。不同紅、藍與遠紅光組合光源光譜可以影響並控制某些植物病源菌的發生。近期更被應用於植物工廠作為短期葉菜類立體化栽培的人工光源。

二、 高效能熱泵技術在農業的應用與研發

熱泵與空調是一體的兩面，使用冷能時稱為空調，使用熱能時稱為熱泵。如圖 1 所示 (方，2009)，只做冷氣使用時，COP 為 4~5，這代表耗一分電力可吸取 4~5 倍的熱能，只做暖氣使用時 COP 為 5~6，這代表耗一分電力，可供應 5~6 倍的熱能。其額外的熱能來自於吸熱端，這吸熱端的熱源可以是大氣、土壤、河川溪流或地下水等。只需要暖氣或熱水的場合，使用熱泵不僅節能，更能減少二氧化碳的排放。如圖 2 所示 (林，2009)，COP 為 3.5 的熱泵用於供暖，可以比燃油暖氣機減少 54 % 的二氧化碳排放量。這數字取決於各地電力來源的發電方式，日本每單位電量的二氧化碳排放係數是 0.4 kg，台灣約為 0.6，中國則約為 1 kg。

節能效益更為可觀的則是將之應用於能夠同時利用冷能與熱能的地方，譬如旅館、飯店業，美容理髮業等同時需要冷氣與熱水；溫泉與 SPA 業者同時需要冷氣、冷水與熱水；近海養殖漁業需要將引入的海水殺菌與降溫；蘭花業者需要暖氣抑梗與冷氣催花；菇類業者需要高溫滅菌與冷氣等均屬之 (方與陳，2005)。如圖 1 所示，可同時使用時，COP 為兩者之相加，約為 9~11。

蝴蝶蘭催花所需的空調系統，需要維持溫室內 25/20 度 C 的日/夜溫度，蝴蝶蘭抑梗所需的加熱系統，需要溫室內全年維持 28 度 C 的溫度。一般業者前者使用空調設備降溫，後者使用燃油加溫機產生熱風或使用鍋爐產生熱水。不僅設備費用提高，對環境的負擔也大。另外，在寒流來襲時，溫室內也不宜低於

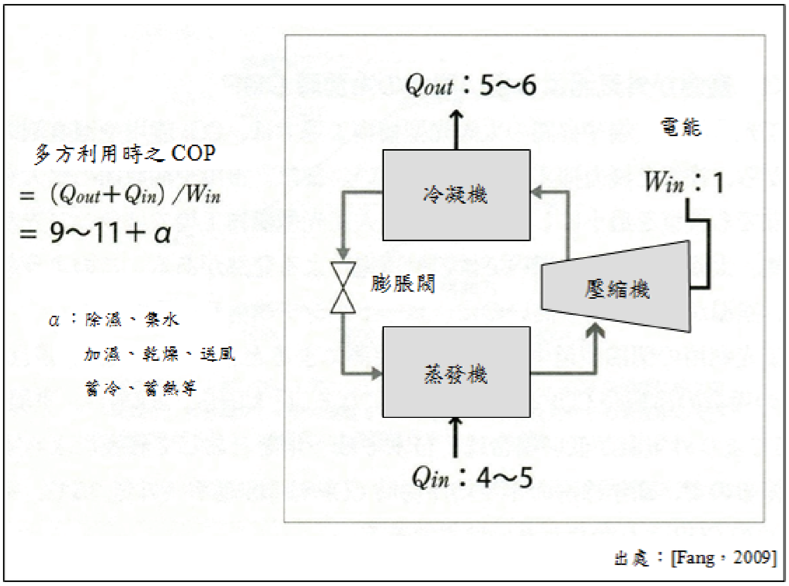


圖1. 雙效空調熱泵之性能係數 (COP)

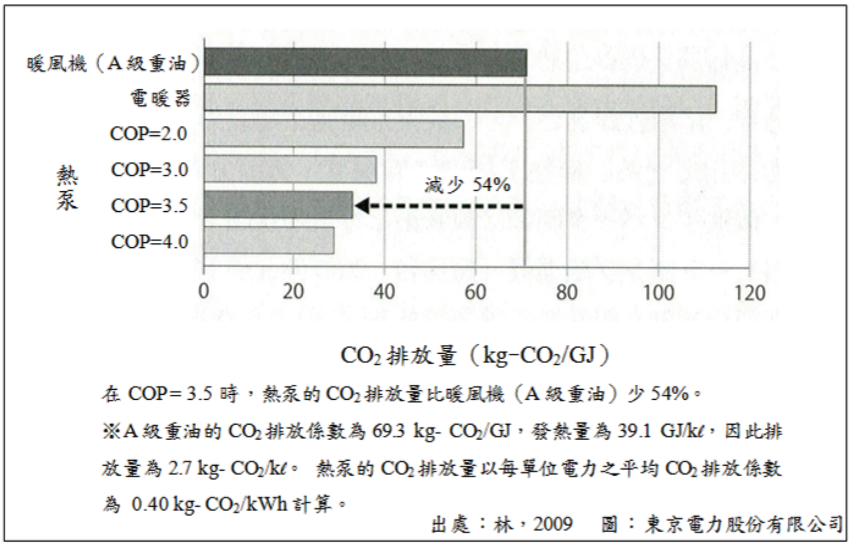


圖2. 使用不同供暖設備供應 1 GJ 熱能之二氧化碳排放比較

18 度 C 的低溫，加熱為蝴蝶蘭栽培的必需設備。本研究繼過去開發的加溫降溫與除濕三合一設備之外，擬開發可直接搭配業者現有冷氣系統使用的廢熱回收專用機。該設備可直接取代加溫設備，用來生產熱水作為介質高溫滅菌、作為組培瓶高壓蒸汽殺菌釜所需蒸汽的前段預熱或者提供生活所需熱水，節約加溫成本。

乳牛數在 200 頭以內的酪農戶，儲乳槽一般使用的冷凍系統的主機為兩台 5 噸的壓縮機，冷媒經熱排散熱再經膨脹閥降壓之後，在儲乳槽內提供冷卻能力。每次擠乳之後，則需透過 75 度 C 高溫熱水沖洗管路，以達殺菌之目的。高溫熱水的產生通常透過電熱系統，將常溫水加熱至目標溫度。本研究旨在透過第一年度建立的熱回收裝置回收儲乳槽冷卻系統所產生的廢熱，直接用於產生 75 度 C 熱水，提供擠乳管路的消毒滅菌之用。新廠可以不需安裝電熱設備，降低投資成本；舊廠亦可不需啟動該電熱設備，只利用其儲水桶存放熱水。

部分菇類的生產需要長期低溫的環境，譬如目前盛行的健康食品中的巴西蘑菇與冬蟲夏草的生產，吃火鍋必備的金針菇的生產等，前二者在採收後也需要使用燃油加溫機進行乾燥，採收後未立即烘乾者則需要將生鮮產品作低溫冷藏。針對乾燥產業的應用，譬如：現階段低溫乾燥使用空調機，熱氣則對外排放，高溫乾燥則使用燃油加溫機。低溫乾燥可產生良質米但乾燥時間久，高溫乾燥可快速完成乾燥作業但亦造成穀粒胴裂，兩者可合併應用，充分達到最佳化目標。另外，使用低濕空氣進行常溫乾燥之設備，亦可以使用空調熱泵系統對引入的空氣做降溫除濕與回溫。

綜上所述多種領域均有使用空調熱泵的空間，若能導入高效能系統，可有大幅度的節能減排效果。不僅在農業上有不少應用空間，在工商業界的應用領域也非常廣泛。

三、 低耗能人工光源與高效能熱泵技術在農業的整合應用

植物工廠是實現農作物周年穩態量產的高效能農業體系，可分為兩大類：「太陽光與人工光併用型」與「完全人工光控制型」。

第一類「太陽光與人工光併用型」植物工廠以溫室設施搭配人工光源為主，雖然一般很少使用空調熱泵系統，但如果栽培的作物經濟價值很高，則搭配熱泵使用也是常見。譬如蝴蝶蘭的催花與抑梗溫室，又譬如洋桔梗的育苗溫室或者是蔬菜作物的種苗溫室，國內都已經有業者投資建置大規模廠房。比較可惜的是人工光源的應用在國內還在啟蒙階段，在歐、美、日等國早已是常態。

在此類設施應用空調時，應著重於夜間的降溫，當使用水耕栽培系統時，應著重於水體的降溫。在白天要想將溫室內的熱能以冷氣移走，其耗費的空調成本是相當大的。

第二類「完全人工光控制型」植物工廠的常見樣態是使用隔熱材料與外界隔離的環控室，以使用人工光源搭配熱泵系統為主，這是設施園藝的最高級發展階段，也被認為是 21 世紀農業取得革命性突破的重要技術手段之一。在此所謂的環控包括了氣體與水體環境的控制，可分為風、光、水、養、氣五大類。「風」泛指空氣溫濕度與風速，「光」泛指光量、光質與光週期，「水」泛指灌溉水供給時機、頻度與供給量，「養」泛指灌溉水中包含的營養成分，「氣」指的是空氣中的二氧化碳濃度。

在此類設施內，主要的光熱成本會是人工光源與空調熱泵系統的電費，由於人工光源會伴隨熱量的衍生，空調熱泵系統一般只會用到空調的功能，如果空調系統的性能係數(COP)是 3，人工光源的電費是 X，則整個系統的光熱成本將會是 $X + X/3$。

台灣過去在 80 年代推動溫室水耕栽培，曾經成為風潮，但後續一間間關廠。主要原因在於夏季無法栽培、蔬菜口感不佳等問題。但這些因素都不會在植物工廠內重現。譬如夏季無法栽培的主因在於溫度，尤其是因為水溫提高造成溶氧量降低，植物根系無法呼吸導致容易腐敗。口感不佳則是養液配方的問題，一成不變的高氮肥配方，容易造成硝酸鹽與亞硝酸鹽含量過高，缺乏回饋控制的灌溉與營養管理模式，當然栽培的蔬菜口感差。

過去水耕的失敗經驗在農政官員 、農民與研究者的心中可能已經形成魔障。另外，在某些消費者心中甚至有著無土栽培的蔬菜代表缺乏日月精華的迷思。這些都是台灣推動植物工廠有待跨越的障礙。

台灣的學術界對於植物工廠的推動也有一些雜音，網路上找到一篇中興大學某教授的文章，該文引用日本的舊資料，但解讀有明顯錯誤。該文提到：

在成本比較方面，則顯示此為植物工廠的致命傷。以日本農林水產省的調查數據為例，在 2005 年，1 公頃的植物工廠其成本與養液栽培用溫室之比較如下：

	植物工廠(A)	*溫室栽培(B)*	*A/B*
設置成本	*3.1 億日圓*	*1800 萬日圓*	*17 倍*
能源成本	*1860 萬日圓*	*40 萬日圓*	*47 倍*

依上述討論，完全控制型植物工廠在技術層面簡易可行。在市場面則應慎重。不可盲目擴增造成同質性產品在有限消費市場相互削價競爭，最後為同歸於盡。如果只是在科博館，在大學農學院，各農業改良場搭建一兩棟全密閉式植物工廠，只要有經費那倒是十分容易，也可做為科學教育之用。但是要以此型全密閉型植物工廠就可以開創農業生機，就可以以此給農民帶來利潤，那只是欺己欺人而已。

首先，日本迄今都沒有一公頃的植物工廠。其次，如果是一公頃的溫室，全年的能源成本只有 40 萬日圓，這也是很難想像。在台灣，一千坪 (約 1/3 公頃) 的溫室，寒流期間一個月的加溫費用就不只這個數字。

筆者查到該表格來自日本農林水產研究報告編號 14 號，出版於 2005 年。原文如下所示：

表6　植物工場と施設生産のコスト比較（10a当たり）

植物工場の建設費、維持費は従来の施設に比べてはるかに高額です。

	植物工場1）（A）	施設生産2）（B）	A／B
設置コスト	3.1億円	1,800万円	17
ランニングコスト（光熱費）	1,860万円	40万円	47

1）植物工場は、K社TSファームタイプ（720㎡）の完全制御型施設の値に基づく

2）施設生産は、ビニールハウスでホウレンソウ等の養液栽培を行うM農園（858㎡）の値に基づく

由原文可發現，該教授誤解了日本使用的面積單位，10a 並非一公頃，而是 0.1 公頃 (1000 m^2)。植物工廠 A 引用的數據來自一間 720 m^2 的植物工廠，設施生產 B 引用的數據則來自一間 858 m^2 的農園。為了方便比較，原文作者將數據調整成 1000 m^2。再者，此表格為五年前的老舊數據，不適合用於現在來評估植物工廠之可行性，主要原因有三：

1. 在日本早已了解採用 TS 式的植物工廠 (上表附註 1)的光熱費用太高，類似工廠多已被淘汰或是慘澹經營中。TS 代表 Triangle panel and Spraying technology，這是早期使用保麗龍架成三角形狀的栽培床，使用高壓鈉燈為人工光源的系統。產能比傳統的溫室生產方式增加有限 (約為 1.4 倍)，耗電與成本卻都多太多了。現在受到重視都是採用高效能螢光燈管、LED (Light-Emitting Diod 發光二極體) 或是 HEFL (Hybrid Electrode Fluorescent Lamp 混極螢光燈管) 等，此些燈管的效能高且散熱少，光熱費用比使用高壓鈉燈的情況要低很多。

2. 植物工場的設置成本由 2005 迄今已經降低了很多，並且持續降低中。 於 2008 年四月落成的 Fairy Angle 公司設於福井縣的植物工廠為全日本目前規模最大的，年產量達 300 噸，每日量產 8000 株萵苣，建築面積占地 2896 平方米，公司資本額約 600 萬美金，在當年約為 6 億日圓。由於該公司有兩間量產廠 (年產量 300 與 150 噸)與三間餐廳 (年產量 6 噸)，推估單間量產廠的造造價應低於 3.1 億日圓，而此廠的規模比起前述表格的 TS 型態的植物工廠 (720 m^2)大了不只四倍。

3. 兩種設施的產能相差很大，以土地面積為比較基準並不合理，合理的比較方式應該是以年產能做為基準。依據千葉大學古在教授的比較，在相同年產能的前提下，植物工廠的造價可以比溫室低。

日本目前有 50 家植物工廠，但總共生產的萵苣在市場的佔有率也不過是 0.5 %。再者，適合植物工廠栽培的作物選擇仍有極大的限制，目前在擔心植物工廠會對傳統農業造成衝擊與排擠是過慮了。再者，植物工廠不應被狹隘的認為只是為農業帶來生機，為農民帶來利潤的工具，植物工廠有著更大的格局及與時俱進的時代意義。

四、 氮源、碳源與能源系統之整合

空調熱泵與 LED 在植物工廠產業中可有極佳的整合應用，雖說前者的應用以降溫為主，但回收的熱能可搭配其他產業使用，譬如前述菇類的生產。再者，菇類的生產可產生高濃度二氧化碳，這些也正是植物工廠內蔬菜栽培之所需，所以除了熱能可以互借使用之外，氣體成分中的二氧化碳與氧氣也可以互補有無。這樣的設計在生態循環的觀點來看更具意義。另外，植物工廠亦可與循環水養殖做整合設計，後者的養殖廢水中含有高濃度的硝酸態氮，正是前者栽培之所需，兩者整合應用可兩蒙其利。類似設計可參見方(2009)申請之專利。LED 使用市電，後續可搭配再生能源譬如風能、太陽能、生質能與燃料電池等。

五、結　論

LED 除了在環控農業領域取代傳統人工光源使用之外，在作物栽培模式，銷售運輸模式與儀器研發上都有發展空間。動、植物與人體光生理學都是值得深入了解與待開發的領域。尤其是後者，不論是儀器設備的研發或成效的調查，都屬生機領域跨入醫學工程領域很好的切入點。此類研究的進行與落實研究成果需要跨領域的合作與推動，是值得吾人後續努力的方向。

本文亦討論熱泵系統在生物產業的應用，其在工商業界舉凡需要同時使用冷氣與熱水的美髮業、飯店業、SPA 業、食品加工業等亦有廣泛的應用空間。此種方式的能源的再造利用不僅可以降低對環境生態的影響，降低加熱系統成本，更可以有正面的意義。一旦所有鍋爐由熱泵取代，後者對環境吸熱亦有助於抒解全球的暖化問題、都市的熱島問題等。

LED 與空調熱泵在植物工廠可發揮大效用，也都還有極大的進步空間，與其他氮源、碳源與能源系統的整合更值得進一步探討。

參考文獻

1. 方煒，饒瑞佶。2004。高亮度發光二極體在生物產業的應用。中華農學會報。5(5):432-446。
2. 方煒、陳育瑋。2005。雙效型冷凍空調熱泵及其在生物產業的應用。農機/生機論文發表會。
3. 方煒、林清源。2005。發光二極體在生物產業的應用。農機/生機論文發表會。
4. 方煒。2006。發光二極體在生物產業應用的回顧與前瞻。照明學刊。23(1)：26-32。
5. 方煒。2009。結合碳源及或氮源設施之複合式植物工廠。中華民國與中國發明專利。(申請中)
6. 林真紀夫編著。2009。有效利用設施園藝中的熱泵-節能與多方利用-。農業電化協會，159 pp。
7. Fang, W. 2009. Use of heat pumps for energy-saving in protected cultivation. Symposium of controlled closed systems toward efficient bioproduction. Matsudo, Chiba, Japan.

再生能源技術之應用研發

盛中德

國立中興大學生物產業機電工程學系 教授

摘　要

能源指的是比較集中的含能物質，可直接或經轉換提供人類所需的光、熱、動力等型式能量的載能體資源，其中，再生能源則是指太陽能、生質能、風力、海洋能、地熱...等可永續利用的新能源(替代能源)。目前，太陽能的應用主要分為太陽光電能及太陽熱能兩方面，風力則主要用來發電，而生質能主要為植物經光合作用將太陽輻射能以一種生物質型式固定下來之能源，與農業關係密切，生質能的利用依型態區分，可分為氣態（氫氣與沼氣），液態（生質柴油與油精）及固態（錠型固態衍生物與直接燃燒）等，與太陽能及風力等同為未來再生能源應用發展主流，相關的應用及能源轉換技術亦漸趨成熟，亦為本文之探討重點。

一、引　言

「節能減碳」目前已成為全球性問題，過去 10 多年來，台灣的溫室氣體排放量之成長速率在世界各國中名列前茅，台灣 99%(2007 年時，今年約 99.3%)的能源需仰賴國外進口，因而「節能減碳」問題對台灣而言更形重要。隨國內社會經濟蓬勃發展，能源需求不斷增高，能源進口之依賴性不斷提高，社會經濟發展受國際能源影響之衝擊甚大。另方面，人類大量使用化石燃料，產生大量溫室氣體如 CO_2 等，進而衍生出全球氣候異常變遷等現象，嚴重危害環境生態與人的生存。因此世界各國除持續努力解決石油危機所來的能源問題外，亦全力尋找具減碳功能的替代能源(新能源)。2009 年 6 月 12 立院三讀通過再生能源條例，明定再生能源是指太陽能、生質能、地熱能、海洋能、風力、非抽蓄式水力、國內一般廢棄物與一般事業廢棄物等直接利用或經處理所產生的能源，或其他經中央主管機關認可，可永續利用的能源。而太陽能為地球能源之惟一來源，但每天大量的能源射到地球上，地球並無法完全掌控並加以利用，大約不到 0.1%，經過植物的光合作用加以吸收，這也成了主要生質能的來源，而在此過程中還必須吸收 CO_2，而這也成為固定 CO_2 最主要的方法。其它的太陽能透過各種的型式存在地球上，如颱風即為太陽能將能量存在大氣中的一種方法。實質上地球仍蘊藏著豐富的太陽能等著人去開發應用，而人類每逢能源

危機，就會想到太陽能，並積極從事太陽能的開發與利用，此一般即將太陽能歸為再生能源的一種。第一次石油危機發生在 1975 年(又稱為第一次能源危機)，此後人類努力在找替代能源，特別是再生永續能源，此階段太陽能的利用為非常熱門的題目，此狀況一直延續到 1980 年，而後由於石油價格回跌，其它能源在使用方便性及經濟性均無法與之競爭的情況下，替代能源開發與利用的研究熱度大為降低。但在第一次能源危機中，不論在新能源開發與能源利用上，農業均扮演相當積極的角色。

由於生質能源的生產具有固定碳及碳淨產出為零的功能，且有些產品具有取代石化燃油的優點，如生質酒精可部份取代石化汽油，因此一直是替代能源發展的重點。生質汽油的生產雖有所謂能源作物的發展配合，但主要的原料仍是以醣與澱粉為主，而大量的使用澱粉原料，如穀物，也間接促成糧食價格的飛漲，即所謂糧食危機，此也讓生質能源專家警覺到生質能源的發展，除以醣與澱粉為原料外，由多醣類組成的纖維素與半纖維素亦具有用來生產生質酒精的潛力。另外，台灣地小人稠，可耕地有限及糧食危機陰影籠罩下，國內生質能源的發展必須朝利用農業廢棄物的方向發展，此也是國內目前生質酒精研發的重點方向。

二、 技術回顧與目前現況

再生能源依照取代對象，可分為取代電力與取代燃料兩大類，其中太陽能及風能主要可轉換成電力加以利用，太陽熱能收集利用的技術成熟，已有的推廣成效相當可觀，生質能則主要轉換成燃料或電力，兩者取代對象包括煤、石油、天然氣及核能等。而在可見的未來，機動車輛仍然以內燃機為主要動力製造設備，配合此需求未來再生能源最好是液態，如此儲存、攜帶、搬運與使用皆很方便，因應此需求，發展液能生質能技術與產業有高度的迫切性。

(一) 太陽能

太陽能的應用可分為太陽熱能與太陽光電能兩種，在農產業上以太陽熱能的應用較為廣泛。人類很早就開始利用太陽能進行乾燥，以往的日曬法即可歸為此類，但傳統的太陽能乾燥完全靠老天爺幫忙，並無法滿足現在農業乾燥的需要，現在農業配合機械化採收與集約式栽培，傳統方法乾燥速率與效能太慢，而要提昇乾燥的速率與效能最直接的方法，便是將能源密度提高，同時將能源有效使用時間延長，以滿足使用的需要。利用太陽能烘乾糧食和農副產品，是人類在長期生產實踐中摸索出來的經驗，而且目前進一步採用太陽能糧食烘乾機。其他的應用目前已有發電、熱水、

空調、溫室和蒸氣消毒等:利用太陽能裝置的住宅，叫做「太陽能屋」，將各式集熱器裝在屋頂或牆壁上，冬天供暖氣和溫水，夏天促進室內空氣流通或供冷氣。在農業的應用上，溫室亦應用了太陽能，溫室將太陽的能量貯存在一個空間內，令植物得以在四季如春的室內生長(參考圖 1)。太陽能熱水系統屬乾淨、無污染的再生能源，對減緩能源與環境危機有極大之幫助，將太陽能儲存於水中再加以利用的方式，是目前台灣最具商品化的太陽熱能技術應用產品(熱水系統)，其應用的型式包括家用熱水器、宿舍／旅館盥洗系統、工業製程預熱系統、漁業養殖及溫水游泳池等。近年來太陽能熱水器在政府的補助推動下已有越來越多的家庭安裝使用，可見其效率已漸受肯定。

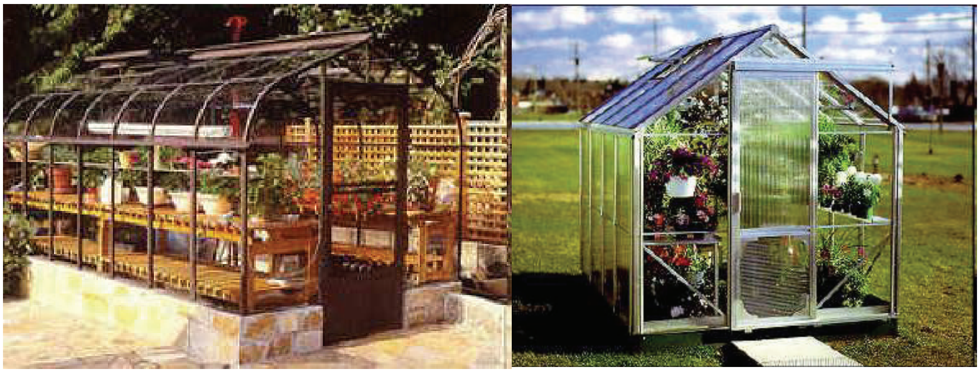


圖 1. 太陽能溫室

在農業上太陽能光電的應用仍不普遍，主要原因為太陽能發電成本高，回收年限長，一般農戶無法支應。以太陽能現今最優惠方案估算(1-10 瓩，安裝費 17 萬元/瓩，另補助 5 萬元/瓩，故成本為 12 萬元，收購價 11.1883 元/度，產電能一般介於 3.7-3.9 度/日) $11.1883\times 3.95 \times 365 = 16,131$ 元，約需 7.44 年方可回收。若農戶自用，每度電的成本在 2.5-3 元，其回收年限約為 27.4-33.3 年。

近年來有利用太陽能電池結合 LED 燈應用於植物工廠的照明，以國外的發展較為先進，在植物工廠的領域中，日本已有相當不錯的成果(參考圖 2)。植物工廠的特性是環境可控制且可依照計畫允許全年無休的穩態量產植物，但因其設施成本高(設置初期佔總生產成本 1/2 以上)，在太陽能發電技術未能達經濟效益前，其所生產的蔬果在價格上很難與當季的蔬果競爭，在歐美因嚴寒的冬季無法生產蔬菜，植物工廠所生產的蔬菜因無競爭對象，故仍有其競爭力。

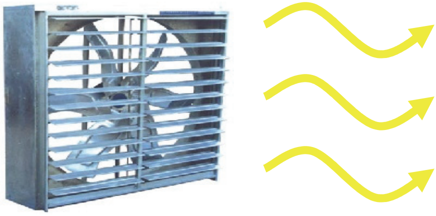
圖 2. 日本規模最大的植物工廠:日產 8,000 株、年產 300 噸

(資料來源: 臺大農業推廣通訊 雙月刊，99 年 6 月)

(二) 風力發電

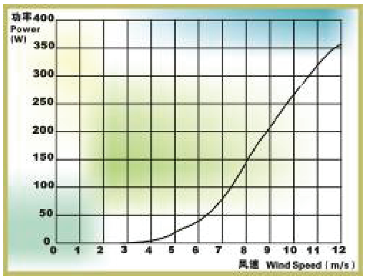
風力係取之不盡且無污染的能源，無安全上之顧慮，而且容易裝設，不似其他的發電設施一般需要定期的保養維修，但主要缺點在於風力發電機組只能擇風強之處來裝設，其發電容量遠比火力發電機組之容量為小，並會因季節性的風力變化而影響其穩定度，以致僅能彌應部份電力之供應，未能大量取代燃料(石油、煤炭及核燃料)發電之方式。以目前的發電技術而言，約莫每秒 3 公尺的微風便可帶動風車的扇葉，使得發電機感應生電，台灣地區，每秒平均風速大於 5 公尺的區域總面積近乎 2,000 平方公里，風力發電機組大都設置於沿海、離島以及向風面之山峰地區，故在農業的應用上仍相當少見。

在農產業的應用上，以微型風力發電較為可行(參考圖 3)，其應用主要是結合設施(溫室、畜舍...等)之通風設備進行，基本上可提供穩定的風能供風力發電使用，此風能風量與風向皆固定，此特性優於一般多變的自然風，故其發電效能應較目前用一般自然風的為高，此系統目前以配合 LED 提供農業生產所需照明用。目前風力發電的成本比太陽能發電低很多(約 1/4-1/6)，故亦可整合太陽能光電系統來應用，以達到相輔相成的功效。



通風扇

垂直軸微風力發電機



微風力發電機效率圖

圖 3. 微風力發電機

微型風力發電之發電範圍 1-10 瓩，今年之優惠收購電價為 7.2714 元。微型風力發電設置成本：含風機、發電機與控制設備約為 102,500 元/瓩，發電效率與風速有關：10%(6m/s)，27%(8m/s)，60%(10m/s)，100%(12-20m/s)，若以最低效率來計算，農戶安裝一部微型風力發電機，每年以 300 天計約可發電 1,224 度電，若以政府優惠收購電價計約需 11.5 年回收，農戶自用則需 28 年才能回收。

(三) 生質能源

生質能亦稱綠色能源或再生能源，為植物經光合作用將太陽輻射能以一種生物質型式固定下來之能源。生質能來源及分類可概分為廢棄物及植栽兩大類，其中又以廢棄物轉化為生質能源為未來的趨勢，如英國的化學公司 INEOS 於 2008 年 7 月發佈新聞稿，標題是「汽車使用家庭垃圾為燃料將在兩年內實現」，INEOS 擁有從家庭垃圾大量生產生質酒精的技術。故改以農業廢棄物及非糧食之能源作物作為生產原料，如以農產廢棄物(如稻稈、廢木材) 的纖維生物質為原料生產的燃料級酒精就稱為「第二代生質酒精」。國內農業廢棄物的種類繁多，可概分為農產廢棄物及農業資材廢棄物等，涵蓋農業生產、畜牧場、屠宰場、養殖業、市場與農產品加工等產生之事業廢棄物。農產廢棄物多數屬生物質，台灣每年產生的農產廢棄物總量約為 2,300 萬公噸，可利用新技術轉化為生質能源。

生物質(Biomass)或「 生物質量 」，可泛指由生物產生的有機物質，係人類自然活動中產生之含碳質有機廢棄物，包含植物、農作物、微生物、藻類及動物排泄和代謝物等，可利用熱/化學、物理轉換技術轉化為生質能源(固、液、氣態)。國內生物質雖然隨處可見，但要將生物質轉化為可用能源，其先決條件為具有將這些農業副產物收集、貯藏、搬運的技術與設備，即能高效的將這些農業副產物變成工廠的原料。利用農業廢棄物不需栽種及管理成本，但其質地膨鬆，加上產期與工廠需求無法完全契合，如此收

集、運輸及貯存即成為主要的原料成本，此亦成為目前發展第二代生質能源的主要瓶頸之一及急需發展的關鍵技術。

生質能源用農業廢棄物之田間處理技術：

1. 美國玉米稈之集運作業模式與現況

　　玉米稈(葉)是美國主要的纖維酒精料原，每年的產量約有 12,000 萬公噸，具有每年生產最高達 5,300 萬公秉生質燃料酒精的潛能，超過美國汽油需求量的 10%。為配合年產能 20 萬公秉酒精廠的生產料源的問題，發展快速收集、處理及儲存模式為當務之急，為提昇產業的經濟效益，酒精工廠設於玉米產地。

　　採穗後之玉米稈多數斷裂散落於田間，相當不利於收集與運輸，於 2006 年 John Deere 公司與美國愛荷華州大合作，已開發出玉米稈、穗軸、葉及穀粒同時收集機械。美國玉米收穫期玉米粒之含水率大都在 20%以下，此時之玉米稈含水率仍偏高，故玉米收穫後將玉米稈置放於田間利用太陽能曬乾後再進行收集。收集方式則可概分為切碎壓縮塊狀綑包及圓柱型綑包兩種(參考圖 4)，一為在地切碎處理後，再壓縮綑包成方型塊包，收集後存於室內。另一則採用圓柱型綑包方式，圓柱包外包覆防水透氣塑膠材質可貯存於室外。

圖 4. 美國乾玉米稈之收集(切碎壓縮塊狀綑包或圓柱型綑包)

　　玉米稈的長期儲存，必需先在田間乾燥至安全儲存含水率，以避免儲存期間的變質及乾物質損失。美國玉米稈之儲存又可分為室外及室內兩種，室內儲存之乾物質平均損失約 5%，而儲存於室外之乾物質則平均損失會提高到 15%。除此外，濕玉米稈切碎後以青貯方式貯存的研究亦相當，在儲存 7 個月之乾物質損失約僅 10.9%，而青貯技術在國內已

相當成熟，但目的與美國此項試驗不同，國內的青貯主要是做為動物飼料，故於青貯前通常會添加酵素以保存其營養成份。

2. 國內纖維原料之收集與運輸現況

以國內最大綜之農業廢棄物(稻草)為例：農民認為稻草較適合先在產地處理後再運至物料集運中心，因稻草結構膨鬆，貯藏時很佔空間，且稻草長期儲存有自燃的危險，因此較適合於集中後於產地分散貯放，而不適於集中於一處儲存。農民較易接受的稻草集運方式乃由集運中心委託收集及載運(農民不負責載運)。為了節省人工及降低勞力與收集成本，對非加工製成民生用品的稻草，國內農民常使用稻草綑包機來代替人工收集稻草，參考圖 5，再利用具有吊具的貨車進行稻草綑之搬運；國內稻草飼料業者亦利用稻草綑包機收集稻草並堆放儲存，再將成綑之稻草以機器拆解、切碎及壓縮製成飼料。

圖 5. 使用綑草機收集及搬運稻草的情況

生質能源技術發展現況：

目前生質能源的型態可分為: 固態(固態衍生燃料、固化成型燃料)，易於運輸及儲存，可作為鍋爐、水泥窯的燃料。液態(生質柴油、汽油與酒精)、氣態(氫氣、CO 或甲烷)，作為引擎、發電機與燃料電池的燃料及直接燃燒以產生熱能與電力等。生物質的轉化利用型式包括:熱化學轉換、物理化學轉換及生物化學轉換等。而目前常用來將農業廢棄物轉化成替代燃料之方式

則有乾燥造粒(產製生質煤材:Green-Coal，技術門檻及產品價值較低)、熱裂解(生產生質油料+焦炭:Bio-oil + Char，技術門檻及產品價值均屬中等)及氣化重組(產出生質燃料:Bio-fuel，其技術門檻及產品價值均高)。(參考圖 6)

1. 燃燒利用

農業廢棄物燃燒利用之技術困難度較低，設備購置容易成本低，處理能力與量均大(如具重大天然災害時，可用焚化爐大量處理動物屍體)、且處理時間短，但一般小型設備使用對空氣的污染很高。農業廢棄物燃燒利用目前可分為直接利用及間接利用兩種，所需的轉換技術及應用方式如圖 7 所示。其中先將農業廢棄物轉化為不同形式的固態燃料來供應終端能源設備的燃燒利用方式，包括固態錠型衍生燃料（Refuse Derived Fuel, RDF）及固化成型燃料等，已成為主要的發展趨勢之一。固態錠型衍生燃料是將廢棄物中具有熱值的可燃物製成質地均勻、高熱值、不易腐壞、可儲存、燃燒穩定且不易產生二次汙染物及可有效提升熱能的利用效率的燃料; 固化成型燃料則將農業廢棄物壓縮為成型燃料，以提高能源密度，轉化為方便、清潔的能源形式。

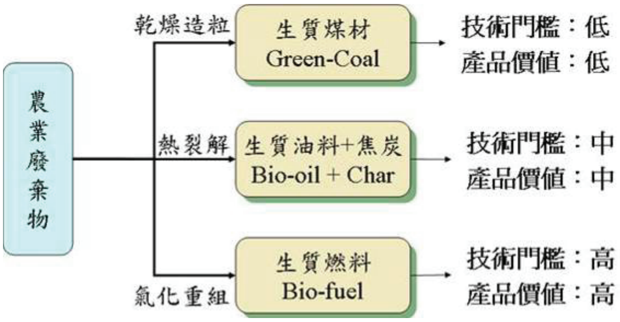


圖 6. 農業廢棄物轉化成替代燃料的方式

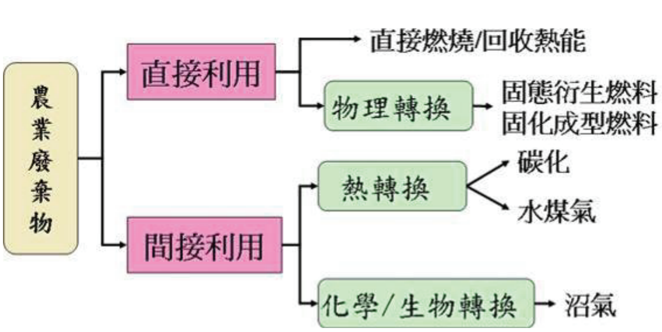


圖7. 農業廢棄物燃燒利用的方式

2. 熱裂解技術(Pyrolysis)

熱裂解是指生物質在反應爐中完全缺氧或只提供有限氧和不加催化劑條件下，高溫分解為生物碳、生物油和可燃氣的熱化學反應過程(參考圖 8)。熱裂解技術種類可分為:(1)慢速熱解（燒碳法），主要用於碳化作業，如燒木碳業，一個流程需數天;(2)常規熱解，生物質原料經數小時熱解，可得到原料重量 20%-25%的生物碳、10%-20%的生物油;(3)快速熱解，將生物質原料細碎後於快速熱解裝置中經數秒時間熱解，生物油的比率可達原料重量的 40%-60%，需要的熱量以熱解產生的部分氣體為熱源供應。

生物質快速熱裂解液化技術是目前世界可再生能源發展領域的重點，熱裂解產生的生物油已可替代柴油用於車輛、農用機械或用作燃料以供熱和發電;熱裂解所產木碳用於冶金製造業和有色金屬生產，亦可用於製造滲碳劑、黑火藥、固體潤滑劑等。生物質快速裂解技術的發展始於 20 世紀 70 年代，北美洲首先開展了這項技術的研究，80 年代初期，加拿大滑鐵盧大學研製出流化床反應器快速熱裂解技術，美國國家可再生能源研究室開發出渦動燒蝕熱裂解反應器，對該項研究起到了推進作用。目前此技術備受歐洲一些發達國家關注，許多科研機構和公司在生物質快速裂解領域中開展了研究，並開發出不同類型的快速熱裂解和閃速熱裂解反應器，但目前存在的問題為快速裂解的條件較難控制，條件控制不好對產率影響較大。國內工研院快速裂解產油技術以流體化床技術為主，可提高生物質熱傳效率，提高產油率，而油品性質近似柴油，目前正進行農業廢棄物（如蔗渣）的快速裂解研究。目前生產生物質液體燃料的技術還不夠成熟，世界相關國家正在從以下幾個方面加大研發力度:(1)提高生物質燃料產品的產出率和品質;(2)開發更經濟高效的轉化設備和技術;(3)拓展生物油應用領域的研究，開發以生物油為原料的高附加值下游產品（化學中間體等）。

3. 氣化技術(Gasification)

氣化技術是指將固體生物質於高溫下進行非催化性之部分氧化反應，將含碳物質轉化為氣態燃料之能源。氣態燃料中最主要之可燃氣體為一氧化碳（俗稱煤氣），其他氣體如氫、甲烷;另外尚有可燃性焦油、焦碳、水蒸氣及灰份等產物，可供作其他用途，如特用化學品等。氣化所生產的燃氣亦可轉化為甲醇配合燃料電池使用。(參考圖 9)

氣化技術的發展，歐洲國家以氣化技術生產柴油為主，位於德國東部德累斯頓(Dresden)地區之 Choren 公司技術已成熟，Beta 工廠 2009 年完工，年產量為 1 萬 3 千 5 百噸，產品品質可比美石化柴油及生質柴油。第二代高品質生質柴油在歐洲售價高達 4 歐元/公升。美國以氣化技術生產酒精為主， Range Fuels 為一家美國公司，由 Khosla Ventures, LLC 成立，於 2007 年獲得美國能源局的 7,600 萬美金研究經費補助，日處理量 25 噸之試驗廠已成功運轉，可利用 20 種以上非糧食之料源，如林業廢棄物、玉米桿等料源。國內工研院之氣化技術以流體化床為主，已完成一般衍生燃料、工業廢塑料及農業廢棄物等多項生質物之氣化測試，並已開發完成流體化床氣化爐之氣化程序規劃及設計等技術。

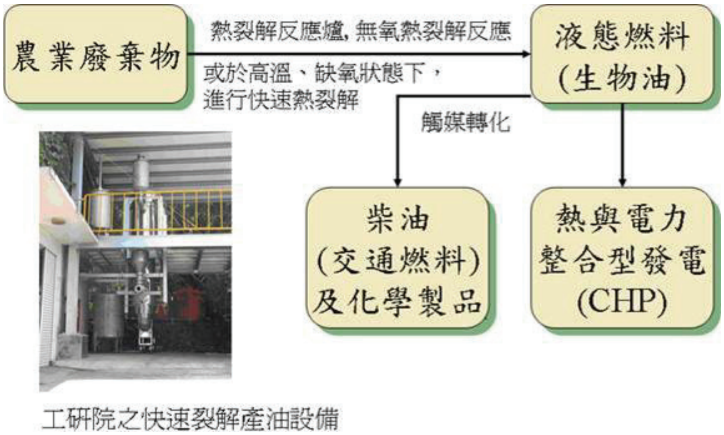


圖 8. 熱裂解技術

三、 未來世界趨勢與國內展望

太陽能的利用上仍受節季、氣候與日夜所影響，又其能源的密度不高，在這種情況下，除非利用很昂貴的聚能設備或設施，要高效能的使用太陽能有其困難度，特別是高溫及高能源密度的使用。而要提昇太陽能效能最直接的方法，便是將能源密度提高，同時將能源有效使用時間延長，以滿足使用的需要，因此歐美地區在太陽能的應用主要包括下列研究主題：

1. 太陽能的收集：主要研究內容有高效能收集板的開發，利用新的高收集效能塗料收集太陽能；利用溫室聚熱的原理，以玻璃夾層捕捉能量；盡可能利用農舍或相關設施的屋頂來增加聚熱面積。另外，也增加太陽收集板的追踪功能，提高太陽直射太陽能收集板的時間與機會。若利用更先進的真空太陽能收集管，則效能將更佳。

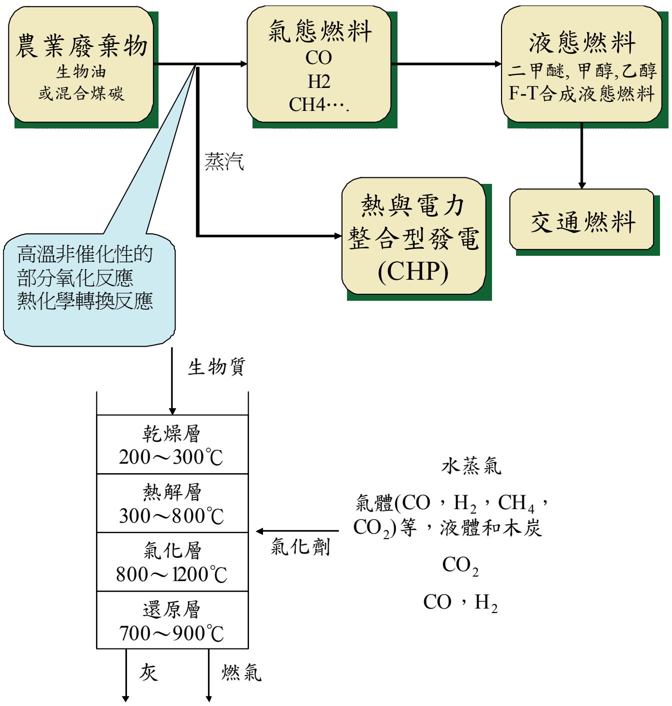


圖 9. 氣化技術及原理

2. 太陽能的貯藏：太陽能雖是一取之不盡用之不竭的能源，但它的供給受自然環境所限制，如晚上需要供給能源時卻無太陽能可用，又如下雨天缺能源時，太陽能也很弱，因此如何延長太陽能有效的使用時間，變成為太陽能研究的重要課題。已有的技術大致可分為乾式與濕式二種，乾式主要是利用熱密度高的物質進行貯熱，如地或石頭；濕式主要在利用水或滷水貯存能量，另利用水的流通性，可進一步地提昇收集效能。另方面即是以電能的方式貯存，當太陽能的發電成本與傳統電價達到平衡時(預估為 2020 年)，太陽能產業的應用範圍未來將愈來愈廣，長線的趨勢向上。德國已巧妙地將太陽能發電應用在建築上，且有效率地運用自然資源，值得各國學習，也是長線趨勢所在。
3. 太陽能的傳遞：太陽能收集與貯藏完成後，接下來的工作便是需將太陽能傳到需要的地方。目前，太陽熱能的應用大多以水及空氣作為介質，已具有相當的效率，國內太陽能應用又以太陽熱能技術之熱水系統最具商品化，應用也最廣；太陽光電能的應用上，目前太陽能電池的轉化效率仍不高(矽基半導體電池-單晶矽 29%、多晶矽 24%與非晶矽 17%)，第一代基板矽晶(Silicon Based)、第二代為薄膜(Thin Film)、第三代新觀念研發(New Concept)：有機或奈米材料，未來在轉換效率及技術不斷的提高下，太陽能光電的應用將相當具潛力。

風力發電方面，在農產業上的應用未來仍以微型風力發電較具潛力。利用集風設施提高風速的技術相當重要，可提高發電效能超過 60%，此應為未來應用的最低要求，但此條件亦只有設施能提供，自然環境要做到很困難。這部份已有研究，但尚未完全商品化。未來，若政府能考慮以適當的補助來提高使用誘因，如 50%補助(5 萬元/瓩，此為太陽能現最低的補助)，回收年限即降為 4 年，可有效提升風力發電的推廣應用。

生質能的利用目前雖然已有成熟的技術與成功的例子，但為了能與已有的能源產品相比，仍有相當的努力空間。在液態應用中之生質柴油與酒精（俗稱生質汽油）由於其具石化燃油的替代性，未來相當看好，將動植物油轉脂化生產生質柴油，技術很成熟，國內也有已商業化運轉的工廠，生產生質柴油，利用國內的休耕田生產生質柴油，有其可行生，國內也正在試驗探討中，惟國內自有油脂作物品種不多，且在不與農爭地的前提下，油脂作物的栽植研究因而暫停。利用植物澱粉生產酒精，國內外技術均成熟，商業化運轉的模式也有，而未來可能遭遇的問題在如何有效地進行田間原料生產，此包括田間收穫與處理，同時原料的貯運也必須納入考量，如水分太高，不只不利甚至無法貯藏，搬運時成本也將大幅提高，但生產能源作物又用很多能源去乾燥是否合乎效益，值得進一步地探討。但若能利用太陽能或農業發棄物的能源來乾燥，有其發展空間。又如何將植物有機廢棄物轉化為酒精也是未來相當熱門的研究主題，目前的重點在如何利用木纖維素生產酒精。固態中錠型衍生物或廢棄物的燃燒利用，技術最為成熟，雖其燃燒熱值不若煤製品，但已具替代功能。國內之能源國家型計畫已於 2009 年啟動，預計五年內要投入新台幣 300 億元的預算，太陽能、風力、生質能…等皆被規劃為子項計畫領域，而氣化技術中的觸媒合成燃油技術亦已納入 100 年計畫中，研究成果值得期待，對我國之永續能源發展有相當的助益。

四、結　語

太陽能為一種高度乾淨的能源，其能源密度雖不高，但配合有效的收集裝置，則相當適合農業使用，過去由於石化能源與電能相對的便宜，太陽能利用的經濟效益並不大，但隨著石化能源與電能的走昂趨勢，太陽能的經濟效益越來越明顯，也值得進一步地開發利用。另外，基於節省能源物資、培植太陽能及風力發電技術的觀點來考量，太陽能光電及風力發電仍有其價值。生質能源的發展，未來仍以利用農業廢棄物為原料較具經濟價值，惟農業廢棄物的密度極低，其收集、運送及貯藏所需成本遠高於穀物，以同樣用來生產酒精而言，

並不具競爭力，故農業廢棄物的減積技術為目前迫切的研究課題。固化成型燃料乃將農業廢棄物壓縮製成，此技術可將農業廢棄物之密度提高至50倍，相當具有開發價值。全球暖化將造成經濟成長 GDP 下降 5～20%，生質能燃燒利用可有效降低 CO_2 的排放，生質能取之不盡用之不竭，並可減少農業廢棄物造成環境污染，因而農業廢棄物資源轉化技術未來發展具有很大的潛力，而從世界各國的方展現況看，未來的發展將會以快速裂解技術及氣化技術為主。未來在推動再生能源的法規架構漸完備，立法完成後發展可期。

參考文獻

1. 方煒。2010。推動植物工廠 開創新 3C 產業。臺大農業推廣通訊 雙月刊。九十九年六月。PP.1-PP.5。
2. 盛中德。2009。農業廢棄物資源轉化發展。中興工程演講資料。
3. 盛中德、黃明仕。2009。生質能源用農業廢棄物之田間處理技術研究。第五屆兩岸能源發展研討會論文集。台南:成功大學。
4. 陳正和。2006。風力發電之應用和效益。台電月刊 527 期:PP.30-PP.33。

以區域農業發展看節能減碳之工程研發-台中場

張致盛
行政院農業委員會台中區農業改良場 場長

摘　要

台灣中部農作物相複雜、種類繁多，且兼具高經濟價值的特性。由於產業的演進，農業生產面臨技術轉型與經營結構改變，台中區農業改良場擔任推動地區農業發展的角色，自當充實研發智能與展現服務熱誠，配合政策與農民需求，協助提升產業競爭力。在農業科技研發方面，為因應氣候變遷與逆境調適，本場直接或間接調節人力、物力和經費於節能減碳研發工作，可概分為電照在作物栽培管理之應用、節能管理技術、省工自動化機具之研發、溫室及設施環境改善與管理等 4 大部分，也有具體成效落實於農業生產與應用。另針對未來產業需求與展望，則根據產業的需求與科技的進步，擬定高效率節能燈具在作物生產產期調節之應用、溫室披覆材質改善、資通訊技術及灌溉技術之應用、農業精準生產管理、建立植物工廠標準生產模式、藍色革命與師法自然之概念應用等議題或構想。期望藉由產、官、學、研各界的分工合作，以及栽培管理與農業工程的整合運用，進行以節能減碳為目標之研究開發與推廣利用，為台灣農業永續經營與地球環境保護，共創雙贏。

一、前　言

台灣中部兼具溫帶、亞熱帶及熱帶氣候，農業生產作物相複雜、經濟種類繁多與具高經濟價值的特性，包括水稻、雜糧作物、特用作物，熱帶、亞熱帶及溫帶蔬菜、花卉等。由於產業的演進，國內農業生產面臨技術轉型與經營結構的改變，本場面對外界殷切的期待與需求，不斷加強同仁專業研發智能與推廣服務的熱誠，配合政策與農民、產業需求，以新視野、新理念、新技術與機動性，承擔推動地區農業發展的角色，進而提升產業競爭力。

最近數十年來，由於人類工業化蓬勃發展，造成二氧化碳、氧化亞氮、甲烷、氟氯碳化物等溫室氣體（GHG）的大量排放，在地球暖化過程中扮演重要的角色。全球平均氣溫逐年攀升，使得不尋常的極端氣候發生頻率增加，這種氣候變遷的現象，對於農業生產勢必造成嚴峻的考驗。所以，行政院農業委員會於本（99）年 6 月 15 日舉行全國性之「因應氣候變遷農業調適政策會議」，提出具體可行之因應策略與採行措施，供農業部門加以參考依循，期達成農業

調適和、落實永續經營的終極目標。其中「第四核心議題：氣候變遷下農業部門節能減碳之策略規劃」引言報告強調：「節能減碳」是全球重要而且是無悔的行動，並針對「減少溫室氣體的排放」與「加強碳匯吸存以抵減（offsets）溫室氣體的排放」等 2 個方向進行討論，以及確切指出農業部門需要廣泛的在能源利用、水資源管理、自然資源保育、空間規劃與土地利用等多面相進行調整。

本場在區域農業發展上，為因應氣候變遷與逆境調適，各領域試驗研究人員既分工又合作，積極進行抗逆境品種培育、栽培技術建立、病蟲害防治、合理化施肥、設施環控生產等研發與推廣，亦直接或間接調節人物力和經費於節能減碳的試驗工作，並也有一些成果績效落實於農作物之生產應用，例如設施棚架式高莖作物用的電動自走式升降作業機、電動自走鼓風噴霧機、溫室無線監測系統等。但現階段仍有許多栽培管理項目，需要藉由節能型機械化、自動化配合加以作業，並與農業工程相結合，以期真正達成且符合「減緩溫室氣體排放產生」、「調適氣候變遷衝擊」的既定策略，為地球環境善盡一己之責。

二、 節能減碳研發現況與成果

(一)電照在作物栽培管理之應用：

1.菊花電照省電技術：菊花為短日照植物，在自然氣候環境下，於秋天日長漸短時開花，俗稱秋菊。一般於夜間連續電照 3~4 hr，便可以抑制開花，並達到控制株高及調節產期的目的。傳統菊花電照每公頃每季需電費 42,000 元，佔非勞力成本 18%，是菊花栽培極為重要的支出（圖 1）。經本場研究採行間歇式電照、使用省電燈泡及改進電燈架設等 3 個省電方法，將電照時間分為 8 段，每段 30 min，每段間光照 10 min、熄燈 20 min，週而復始，共 8 循環；並使用 23W 的黃光省電燈泡進行光照，其照度與 100W 鎢絲燈泡類似，但用電量僅約 1/4；又將菊花之電燈架設改為燈行與燈距各為 2.6 m，燈泡高度為 1.6 m 等，整體照明支出約可節省電力 60% ，相當於每公頃每季可降低生產成本 25,200 元。此項研究與推廣應用，不僅提高菊花栽培農友之淨收益，也充分符合節能減碳的功效。

2.紅龍果電照調節產期技術：中部地區紅龍果栽培面積占全台的 33.7%，但產期過於集中在夏季，造成不小的銷售壓力；雖已有利用冷藏方式來調節盛產期的出貨量，但夏季果實多而小、甜度低；而秋冬季果實產量少、大又甜，頗具市場吸引力。因此，若能延長產期，並提高冬期果的產量，對其經濟價值將大有助益。本場遂利用省電燈泡夜間燈照技術（圖 2），可收穫非產季的冬期果，提高果實重量及糖度，有效延長採收期 2~3 個

月，並增加產量 50%以上。此產期調節技術不僅可增加農友收益，更可讓消費者品嚐到新鮮且高品質的紅龍果。

3. 葡萄電照提升品質技術：中部地區葡萄在生育初期正值低溫期，容易遭受寒流低溫之傷害，造成枝梢過短及著果不良，會影響日後的結果與品質。為解決此問題，本場研發在開花期間給予夜間電照（圖 3、4），藉照光促進枝梢生長與提高著果率，並已有具體成果而廣泛應用。惟以往農民大多利用水銀燈照射，其耗電且成本較高；為建立完整的生產技術，本場乃利用日光燈、省電燈泡等較節省能源之燈照方式進行試驗比較，證實其效果與水銀燈相當，亦可節省 1/3~1/2 之電費，達到節省能源且降低成本之成果。

(二) 節能管理技術：

1. 推行作物合理化施肥：施肥過量不僅浪費生產成本，超施化學肥料甚至造成耕地劣質化而影響後續之產量與品質，並且增加二氧化碳之排放量。本場配合農委會推動「合理化施肥」政策，針對轄區內較大宗作物，

圖 1：菊花電照應用

圖 2：紅龍果電照應用

圖 3：葡萄電照應用（俯視）

圖 4：葡萄電照應用（仰視）

進行最適施肥管理之試驗比較與示範推廣（圖 5、6、7）。以南投縣埔里鎮的茭白筍為例，農民每公頃之慣行施肥量約為氮素 390 kg、磷酐 210 kg 及氧化鉀 254 kg，經試驗調查並推薦最適施用量與施肥方法，則整體共可降低 26%的用肥量。以合理化施肥示範區和農友慣行區生育調查結果顯示，其產量及品質性狀並不因減施用肥量而降低，且每公頃可節省購肥成本 6,400~10,600 元。所以，本場近年來積極辦理宣導講習及觀摩會，本（99）年度預計完成教育講習及技術座談會 150 場次，輔導建立合理化施肥示範農場 35 處，舉辦田間成果觀摩會 15 場次（圖 8），期望農友每年逐步減少肥料用量至推薦範圍。另以水稻每年減施 10%用肥量估算，其將可減少約 800 ton 二氧化碳之排放，對於維護地球生態環境與農業永續經營，皆有極大的貢獻。

2. 試驗研究太陽能防治農作物病蟲害與消毒農業資材技術：台灣地處亞熱帶、熱帶氣候區域，擁有充分的日照條件，將太陽能轉變為可用之能源（包括電能及熱能），應用在防治農作物病蟲害，有助於達成節能減碳之

圖 5：果園放射條狀開溝施基肥

圖 6：水稻合理化施肥

圖 7：落花生合理化施肥

圖 8：合理化施肥示範觀摩

目的。例如本場利用太陽能誘蟲燈誘引防治害蟲（圖 9），在蔬菜園進行誘殺試驗結果顯示，其對於黃條葉蚤、番茄夜蛾、斜紋夜蛾、甜菜夜蛾、小菜蛾、葉蟬等蔬菜主要害蟲，具有誘殺的成效，並可達降低農藥施噴次數的目的。另利用太陽能熱水系統消毒菊花苗栽培介質（圖 10），經試驗測得溫度在 50℃以上達 112 min，且 3 種苗期土壤病原菌完全無法存活，可避免傳統燻蒸劑消毒造成環境污染，以及蒸氣消毒消耗柴油（2.4 *l* /m^2）等化石能源的問題。

3. 農業廢棄物再利用研究：

(1) 稻草處理機械化作業系統：針對田間稻草收集處理作業需求，試驗研發稻草處理機械與建立相關機械化系統，以提供生質能源生產運用，可解決現行稻草焚燒所產生之空氣污染等問題，亦可推動農產廢棄物之再生利用，達到節能減碳的效果。其中進行中之粉碎稻草擠壓成型機械，係將蓬鬆稻草予以切碎後壓縮成圓棒狀，不僅降低稻草體積、搬運方便，亦可作為生質燃料之用，充分達到替代燃料應用與固碳的功能；若供為纖維酒精之生產料源，對於後續水解、發酵等處理流程，也可能因料源接觸面積增加，具有提升處理效率之結果，此部分本場農機同仁正積極進行試驗研究與改良工作。

(2) 耕種後舊介質再利用技術：台灣設施果菜類蔬菜已普遍使用介質生產，栽種介質平均 2 年須更換 1 次，每次費用 60~80 萬元/分地，若以泥碳苔進口量估計栽培面積約 25 ha，每年花費逾 1 千萬元。本場研發耕種後舊介質再利用技術（圖 11、12），可減少老舊介質物理、化學、微生物等特性逐漸惡化之情形，並降低舊介質拋棄量與農民生產成本支出。該項技術業於 97 年完成技轉與推廣應用。

圖 9：太陽能誘蟲燈

圖 10：太陽能熱水消毒系統

(3) 杏鮑菇栽培介質製作方法：食用蕈菇類普遍採用太空包栽培，全台使用量 4 億 7,300 萬包，若每包木屑以 0.9 kg 計，則總使用量逾 42 萬 ton。本場研發杏鮑菇栽培介質製作方法（圖 13、14），利用有益微生物將廢棄舊介質混合新木屑而成栽培介質，可減少 20~40%原料需求，降低農民生產支出，達到減少樹木砍伐、環境保護與廢棄資源再利用之效益。該技術業於 99 年完成技轉與推廣應用。

(三)省工自動化機具之研發：

1. 電動自走式管理作業機械：有鑑於極端氣候發生頻繁，農友採行設施栽培者日漸增加，但設施內生長環境較為封閉，作物栽培亦較密集，相對地增加許多管理的困擾，若輔助作業之各類農機具，其動力源仍使用傳統之引擎驅動式，則不僅造成室內廢氣污染，不利作物生長，更繼續消耗化石燃料。本場研發完成電動自走式升降作業機（圖 15、16），採直流馬達與電瓶為行走動力，油壓裝置驅動工作台升降，舉升高度約 80 cm，

圖 11：接種液態複合微生物

圖 12：堆積發酵改善介質特性

圖 13：篩選菌株與研發接菌技術

圖 14：杏鮑菇舊介質之再生利用

圖 15：電動升降作業機(四維牌)

圖 16：電動升降作業機(廣源牌)

載重量達 200 kg 以上，作業效率較人工快 3 倍，每次電瓶充電可使用 2~4 天。該機 95 年度完成技術移轉予四維機械廠有限公司和廣源農業機械有限公司等 2 家業者，該 2 牌型於 96 年度皆列入新型農機補助計畫之機種，可供設施棚架式高莖作物登高採收、管理與搬運作業應用。目前共計推廣 150 餘台，創造產值達 1,300 萬元以上。另本場研發並完成技術移轉之電動自走鼓風噴霧機（圖 17），採用全電力驅動方式進行行走、舉升、鼓風及噴霧功能等，皆是直接降低化石能源消耗而研發推廣之實例。

2. 其他各類省工、自動化機具之試驗研發與推廣應用，除對於提升作業效能、降低生產成本，具有一定程度的貢獻，相對也是間接促成節能減碳的推動方式。若以本場研發並完成技術移轉之乘坐式果園割草機（圖 18）為例，其不僅作業效率較背負式割草機快 6-8 倍，較自走式機型快 2-3 倍，也可避免果園使用殺草劑而造成土壤流失與劣質化，以及環境源污染等問題，更達到固碳與涵養水資源的目的。然割草機使用柴油引擎驅動，係消耗化石能源的負面表徵，但依據前述優點而權衡得失，其整體仍堪稱具有減碳功能。

(四)溫室及設施環境改善與管理：

1. 自然通風器於設施通風散熱之應用：日本設施園藝界稱為「換氣」的通風作業，是設施內部微氣候管理作業最重要的一環。本場與中興大學農機系（現更名為生機系）合作，將工業廠房常見用來排放熱氣、穢氣之免動力渦輪式自然通風器（圖 19），裝設於鋻管塑膠布溫室屋頂上，以進行設施內部之通風散熱功能測試。該通風器只要外界風速達 0.5 m/sec 以上就會開始迴轉，並藉由熱空氣上升與對流原理而逐漸加速，不需要外加動力，即可達到設施內氣流移動與通風、換氣的目的。此免動力通風器之應用，可提供給設施

栽培農友在環境控制與作業管理上多一種選擇，亦可取代較為昂貴的電動天窗、側窗及太子樓屋頂結構等，並達到降低設備投資成本、提高生產淨收益的成果，更是一項節能減碳方式之應用例。

2. 溫室精準灌溉系統之研究：為因應水資源之日益匱乏，有效節約水資源，減少人工介入調整之勞力負荷，確保作物正常生長發育，並降低用水、用電量及施肥量等能源與資源之消耗率。其中本場研發完成之基本型養液自動調配灌溉機具（圖 20），養液可以依特定比例，自動混和並輸送到指定田區，系統前端不用設置養液混合桶，可免除人工調配養液、供水及抽送養液等繁複作業所需時間，主機簡潔實用甚具商品化價值。該項成果業於 98 年完成技術移轉，正推廣應用中。

3. 遠端監控技術之研發：目前國內運用溫室進行作物生產，多運用自動控制系統進行溫室內部環境控制，以期達到最佳生長環境狀態。但由於系統各自獨立，微氣候環境資料與作物生長關係，無法整合，本場整合資通訊技術，結合前端感測系統元件，進行微氣候環境資料收集，並定時透過通訊網路，將收集所得資料傳送至遠端電腦資料庫集中管理，並進

圖 17. 電動自走鼓風噴霧機

圖 18. 乘坐式果園割草機

圖 19. 設施應用之自然通風器

圖 20. 養液自動調配灌溉機具

行統計分析、繪圖與環境控制設備之逆向操作與控制等加值運用(圖 21、22)。經營管理人員不但可以隨時掌握其設施之運作狀態，更可藉由電腦端之資料回溯與分析，反饋於栽培管理，提升其作業效率，使系統管理人員管理能力極大化，且達到無遠弗屆之管理目標，亦符合省時、省工與節能減碳的目標。本項成果業於 98 年完成技術移轉，正推廣應用中。

4. 蝴蝶蘭遠距動態影像行銷系統之研究：以自動換棟噴霧兼掃描管理系統為基礎，研發應用於蝴蝶蘭溫室之 e 化軟硬體系統，藉網際網路自遠端觀看蘭園動態影像與資訊，吸引買主如親臨看貨並即時下單，達成網路無遠弗屆與行銷拓展的效果，亦節省往返舟車勞頓之成本花費，間接達到節能減碳的目的。

5. 節能型植物工廠化管理技術之研究：針對因應氣候變遷農業調適政策會議研擬策略之開發節能型植物工廠化管理技術等措施，本場依據轄區內產業需求，規劃進行 LED 等人工光源對於作物生長影響，並建立蔬菜種苗、短期葉菜之最適光照模式，以及相關節能型環控系統之試驗工作。期望配合植物工廠之發展，建立各類蔬菜最適標準化栽培條件，進而達成節能生產的目標。

三、 未來產業需求與研發展望

(一) 高效率節能燈具在作物生產產期調節之應用：本場轄區內主要作物之菊花、紅龍果、葡萄、茭白筍等，均有運用電照進行產期調節與調控生長。其中在燈具選擇方面，菊花相關試驗研究較多，從早期之白熾燈泡，到現在廣泛使用省電燈泡，並推薦採行間歇式照明與更新燈具架設方式，以及嘗試使用 LED 燈，皆具有不同程度的節能減碳成果。另紅龍果、葡萄、茭

圖 21. 溫室無線監測系統

圖 22. 遠端監控技術展示

白筍則分別使用高壓鈉燈與省電燈泡等，進行產期調節的試驗與應用。目前除菊花外，相關作物生產所利用燈具使用配置、光源強度、照光週期外，均未經仔細研究，以葡萄為例，光源在棚架之下，光線向下照射，可是枝條、葉片卻在燈具上。其可能改善對策包括：

(1) 運用高效節能燈具（如 LED 燈具）與光源設計，改進目前點光源之設計缺點，將光源均勻化，成為面或線狀，避免局部光量過高，再配合作物最低需光量與照光週期之自動控制，減少耗電量。

(2) 探討作物需要的最佳光質，目前所用的燈具均為全光譜型，而 LED 燈泡則為一具特定波長燈具，作物所需之光質若有不同，可以運用不同 LED 燈泡進行最佳組合，減少不必要波長的部分，即可節少能量消耗。此部分尚需與農業工程人員加以協助，方能獲致最佳的結果。

(3) 最佳光量控制，如同菊花一般，運用自動控制系統，結合短暫週期性的光照，相較於連續光照，可以節省大量能源，此部分技術亦待進一步開發。

(二) 溫室披覆材質改善：目前國內運用各種型態溫室進行作物栽培，均會有夏季室內溫度過高之問題，目前已運用風扇、水牆、遮陰網，甚至冷氣設備等，配合自動控制系統進行調控。但是夏季溫室內部溫度過高，主要係過多太陽輻射能量進入溫室內部。所以，可能改善方法是找出作物最適之需光質與需光量，並運用適當披覆材質，在不影響作物生長的條件下，濾除過多不需要的光線，減少熱量進入，即所謂「就源管理」。此項工作需跨多領域進行合作，初期成本勢必較高，且非短期之內會有成效，但值得進行試驗研究。

(三) 資通訊技術（Information and Communication Technology, ICT）與灌溉技術之應用：目前運用通資訊傳輸技術進行環境監測、控制、資料傳輸與灌溉、施肥技術均有初步成效，設備運用技術也較成熟，LED 光源應用亦在初始階段，但相關設備尚不完整，且缺乏標準操作程序，設備操作與作物生長關係，資料無法累積，缺乏系統整合。其改善方法是加強作物生長研究與農業工程研發人員之合作，方能建立最佳化生產管理模式。此外配合運用資通訊技術，將資料整合進行分析與加值運用，減少管理人員往返各地，更可藉由減少碳足跡而達節能減碳之綜效。

(四) 農業精準生產管理：作物合理化施肥除宣導現行肥料量減少與推薦最適用量外，更進一步是強調精準施肥，甚至延伸至施藥、灌溉等管理作業。若能針對不同田區應用可變率技術（Variable-Rate Technology, VRT）於肥料、農藥施用或灑水時，可即時或預先偵測、判讀田區狀況，再施以最適當的肥料或液體用量，以達精準生產管理的目標。一般完整的可變率技術，需

結合農耕資料庫決策、全球衛星定位、管理紀錄及農機具作業等系統，尤其可配合小地主大佃農政策之推動，進而達到精準農業（Precision Agriculture）生產管理之成效。

(五) 建立植物工廠標準生產模式：因應消費市場多樣化需求，建立各種植物工廠適合栽種作物（含種苗）之標準生產模式與條件，實際運作時再搭配監測系統，進行即時生產環境等調控，以解決天然災害、極端氣候等逆境造成生產管理之不確定或異常狀況，並具有調節農產品供銷失衡與避免物價過度波動的功能。

(六) 藍色革命與師法自然之概念應用：剛特‧鮑利所著之「藍色經濟（The Blue Economy）」，強調應該師法自然界生物，運用可再生材料，不留任何廢料或造成能量損耗，落實永續發展，即重視「保育」與「再生」。諸如瑞典的學校、倫敦動物學會的房舍，靠著觀察白蟻窩得來的靈感，設計出有效降低室內溫度的建築；仿效沙漠甲蟲採集水氣的方式，就能在年雨量不到 1/2” 的地區，成功打造出集水系統；全球各地的工程師紛紛參考分子與光合作用的流程，積極開發更節約的太陽能系統等。此係將天馬行空的想法，實際應用在生活上；而我們的農業生產與科技發展，為因應氣候變遷、節能減碳，應該也可以朝向師法自然的目標努力或嘗試。

四、結　語

農業生產亦須耗費能源，如何調和生產與節能減碳相當重要。今後可秉持「健康、效率、永續經營」施政方針，掌握低風險、低碳排原則，以確保以最小能源完成作物的生產。本場針對中部地區產業需要，結合農業科技發展，以及「因應氣候變遷農業調適政策會議」所提出之建議策略與採行措施，期望經由產、官、學、研各界，採跨機關、跨領域之通力合作，進行以節能減碳為目的之整合型試驗研究，並加以推廣利用，真正為台灣農業永續發展與地球環境持續保護，共創雙贏的成果。

參考文獻

1.方煒。1993。發展本土化精密溫室與植物工廠之可行性分析。行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告。

2.田雲生、龍國維。2007。乘坐式多功能果園割草機之研製。台中區農業改良場研究彙報 91：49-58 。

3.田雲生、張旭志、陳令錫、何榮祥。2008。電動自走式升降作業機之研製。台中區農業改良場研究彙報 99：11-22。

4.行政院農業委員會臺中區農業改良場網站－技術移轉專區。
http://tdares.coa.gov.tw/view.php?catid=5723
5.何榮祥、田雲生、陳令錫。2008。溫室 GSM 遠距無線傳輸監控系統研發。台中區農業改良場研究彙報 99：1-10。
6.邱禮弘、陳榮五。2004。利用夜間燈照調節紅龍果冬期果之產期。台中區農情月刊第 53 期。
7.胡正榮。2005。夜間電照的溫室葡萄上市了。行政院農業委員會臺中區農業改良場新聞稿。http://tdares.coa.gov.tw/files/web_articles_files/tdares/3270/463.pdf。
8.陳令錫、田雲生、張旭志、何榮祥。2008。電動自走鼓風噴霧機之開發。台中區農業改良場研究彙報 99：51-60。
9.陳令錫、戴振洋、田雲生、何榮祥。2009。自動注入式施肥灌溉系統使用於介質槽耕栽培黃瓜之研究。台中區農業改良場研究彙報 104：29-37。
10.梁燕青。2010。以合理化施肥生產優質健康的食材－中秋食材聖品茭白筍。行政院農業委員會臺中區農業改良場新聞稿。
http://tdares.coa.gov.tw/files/web_articles_files/tdares/6683/1930.pdf。
11.許謙信、魏芳明、田雲生、陳彥睿。2002。菊花電照省電方式之研究：省電燈泡與間歇照明。台中區農業改良場研究彙報 76：43-53。
12.許謙信、龍國維、田雲生、黃勝忠。2003。菊花電照省電方式之研究：最佳燈泡架設法。台中區農業改良場研究彙報 78：1-11。
13.郭鴻裕。2010。第四核心議題：氣候變遷下農業部門節能減碳之策略規劃引言報告
http://www.coa.gov.tw/htmlarea_file/hot_news/coa_webuser1_20100617163826/990621_05.pdf。
14.蕭富元、王曉玟採訪。2010。專訪藍色革命作者鮑利－向白蟻、斑馬學綠建築。天下雜誌 450：200-201。
15.龍國維、田雲生。2003。新型自動化農機之研發。出自”農業科技研討會專集”，165-178。彰化：台中區農業改良場。
16.龍國維、田雲生。2004。台中區農業改良場農機試驗研究沿革與近年成果。台灣農業機械 19(2)：7-11。
17.謝禮丞、謝廣文、田雲生、張旭志、欒家敏。2008。自然通風器在塑膠布溫室之應用。興大農業 65：26-28。
18.剛特・鮑利著。洪慧芳譯 2010。藍色革命ー愛地球的 100 個商業創新。台北：天下雜誌。

以區域農業發展看節能減碳之工程研發-台南場

王仕賢[1]、鍾瑞永[2]、鄭榮瑞[3]、林子傑[4]、楊清富[5]
1.行政院農業委員會台南區農業改良場 場長
3.行政院農業委員會台南區農業改良場 研究員兼主任秘書
2.行政院農業委員會台南區農業改良場 副研究員
4.5.行政院農業委員會台南區農業改良場 助理研究員

一、前　言

自工業革命以來，全球不斷的科學發展及工業技術的進步，造就了人類生活的現代化，帶動全球經濟發展。不過在享受工業發達所帶來生活便利的同時，人類也開始重視產業發展對環境影響問題的嚴重性，近年來尤以溫室氣體過量排放間接導致氣候變遷最為全球所矚目。京都議定書已於 2005 年初正式生效，我國雖非簽署國未被立即要求減量，但在全球低碳經濟與社會發展趨勢下，產業將面臨碳足跡、碳揭露、碳標章、總量管制、效能標準等減排壓力與碳交易需求，仍需早期進行整體產業調整、擬定低碳科技發展目標及規劃配套能源政策。在農業減碳技術發展方面，根據一項不同減排技術成本與效益分析報告，農業管理在成本與效益比較幾乎相當，極具低碳產業發展潛力，而廢棄物處理更被認為具有正經濟效益的減排技術，因此政府應積極確認農業部門的減碳潛力，制定節能減碳發展策略。

台南區農業改良場為全國七個區農業改良場中幅員最大者，服務區域包括雲林、嘉義及台南等五縣市，耕地面積 25 萬 1,429 公頃，佔全台灣 30.83%，農業戶數 22 萬 2,660 戶，佔全台灣 29.75%，農業人口 81 萬 4 千多人，佔全台灣的 26.89%。年平均氣溫為 23.8℃，最高紀錄為 37.8℃，最低為 2.4℃。平均相對溼度為 81%，年平均降雨量為 1,730 公厘，每年 5 月下旬至 9 月中旬為雨季，11 月至翌年 3 月為旱季，年平均降雨日數為 97 天。主要農藝作物為水稻、玉米、落花生、毛豆、綠豆、紅豆、甘藷、胡麻等，主要園藝作物有柑桔類、芒果、龍眼、瓜果類、各種蔬菜、切花及盆植花卉與特用作物。主壤主要為砂頁岩沖積土，排水良好，縱貫鐵路以西概為石灰性，砂土至壤土，肥力較低；鐵路以東則為非石灰性，壤土至黏土，肥力較高。水利設施屬於雲林及嘉南農田水利會灌溉系統，灌溉面積達 14 萬 6 千公頃，但其中有 7 萬 5 千多公頃為輪作田，兩期作灌溉田仍少於本區耕地面積的 14.7%，旱作田達 9 萬 8 千多公頃，因此本

區為全國主要旱作區，輪作制度至為複雜。曾文水庫完成後，對本區農業生產甚有幫助，但仍不敷全區使用。

台南區除雜糧作物多外，設施栽培面積也較多，雲嘉南設施栽培面積極大，其中大部分為水平棚架網室，集中在雲林縣葉菜生產鄉鎮，種植短期葉菜類為主，其次為簡易塑膠布溫室，立柱型(又稱力霸型)塑膠布溫室，另有環控精密溫室以蘭花溫室為主。雲嘉南溫室設施栽培較多地區有雲林縣虎尾、崙背、莿桐、北港；嘉義縣新港、六腳、太保、大林；台南縣官田、後壁等。這些地區部分已發展設施生產專區，如雲林縣虎尾鎮夏菜冬花設施面積達 20 公頃，另莿桐鄉蘿菜設施栽培已有 15 公頃面積並且普遍使用蒸氣消毒土壤，其蘿菜產品具有安全健康特性及穩定通路，已成為蘿菜設施生產專區。此外嘉義縣六腳鄉設施生產小番茄及苦瓜等果菜類也有生產聚落雛型，據估計簡易溫室面積也有 18 公頃左右，但由於設施小番茄栽培地區較多，獲利空間已被壓縮，增加獲利必須提昇產品品質。蘭花溫室除蘭花園區外，民間業者蘭花栽培場建造屋簷更高，面積更大的自動化環控溫室，也引入自動盤床及熱泵加溫技術，快速帶領設施環控發展。中階使用之果菜類溫室則設置內循環風扇或自然通風氣逐漸增加，養液土耕技術也逐漸推廣。

台南場發展區域性農作物品種改良及栽培技術改進試驗研究、植物保護試驗研究及病蟲害發生預測與警報發佈、土壤肥料與施肥技術試驗研究及農業機械及自動化系統研發，在節能減碳與永續農業發展趨勢下，各相關領域研究人員亦著重節能減碳技術發展。近期相關研究有節能、高坪效與自動化蘭花催梗技術；土壤水分含量偵測感應器及自動化灌溉管理系統；自走式噴灌系統；設施週年生產技術；農業廢棄物資源化及太陽能在農業上之應用等，期能為全球低碳經濟及永續農業發展盡一己之力。

二、 台南場設施環控節能與資源再生相關研究

(一) 開發多層架蝴蝶蘭花梗催梗工廠，為完全人工光源型植物工廠理念之設計，其優點如下：(1)蝴蝶蘭苗抽梗整齊，出貨時可省卻分級挑選的人工。(2)蝴蝶蘭苗抽梗時間穩定，容易掌控出貨時間。(3)利用多層架(5 層)設計及自動化作業方式(自走式盤床)，節省降溫費用及操作人力，可以提高硬體設備的利用效率。(4)採用 T5 燈管為人工光源，能源使用效率高。(5)增加灌溉系統可做植物工廠冷季蔬菜。

(二) 發展應用滴水灌溉之節水設備，配合使用土壤水分含量偵測感應器及自動化灌溉管理系統，掌控最佳灌溉時間及灌水量，達成設施甜瓜生產之精準

化灌溉管理目的及成節省農業用水之目標。為求蔬果生產穩定，提升產品良品率及產能，設施蔬菜產業蓬勃發展是必然趨勢，而設施栽培管理自動化、簡單化及省工化更是未來發展及推動目標。因此除已派技術人員前往以色列學習設施蔬菜生產及節水灌溉技術，也規畫派員前往荷蘭學習設施環控管理技術，以提升台南區農業改場於設施蔬菜生產及管理技術發展能力。

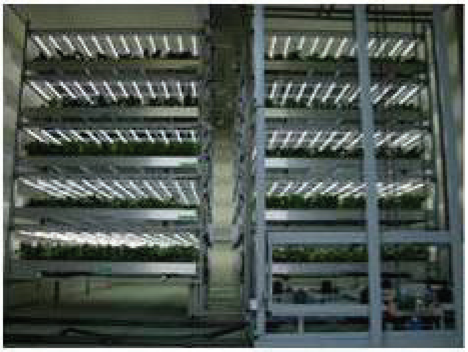


圖 1. 節能高坪效蘭花催梗系統

圖 2. 催梗作業情形

圖 3. 土壤水分含量偵測

圖 4. 自動化滴灌系統應用

(三) 本場自行開發自走式噴灌系統包括驅動主機、噴架、軌道、加壓站、控制系統。驅動主機採用 AC 馬達透過控制器可進行換向及速度控制，且具備緩啟動緩停止等功能，驅動主機配合 U 型齒軌驅動噴架位移進行均勻噴灌作業。噴架為不銹鋼管構架可提供結構剛性並可充當流體管道，其上裝置直動式電磁閥及噴頭可進行分區噴灌控制。加壓站由高壓動力噴霧機及儲液桶組成，可分別加壓灌溉水及養液。控制系統包括配電盤、控制機箱、PC、控制程式(LabVIEW)、人機介面、可進行手動、定時分區控制。本自走式噴灌系統已運轉近半年，噴灌作業均勻平順。使栽培之葉菜品質均一。

(四) 開發設施懸吊輸送裝置，架空軌道動線為圓角矩形鎖固於溫室橫樑，內置牽引鍊條及吊架。配合溫室內不同時期之運量需求，吊籃數量、間距得以拆掛，輸送方向可變換。輸送速度可調整 0~15M/分，主要部份有驅動主機、架空軌道、牽引鍊條、吊籃、控制開關。本系統可附掛作業機具用於噴藥、噴水等作業使具多功能以提高使用率及降低整體設置成本。

圖 5. 自走式噴灌系統

圖 6. 設施懸吊輸送裝置附掛噴桿

(五) 利用設施週年生產以增加設施使用效率的理念，建立夏菜冬花生產模式，充分利用滴灌設備，夏天生產小番茄、小胡瓜，以設施防護避免天然災害的情形下，可穩定夏季蔬果供應量，冬天則以生產高品質的多花菊或洋桔梗外銷日本市場，如此達到設施週年有效利用，增加農民生產利潤且均攤設施成本。

(六) 開發電動葉菜類移植機，利用氣壓缸經由搖臂推轉進給輪，進給輪將穴盤捲入並透過精確之定位機構，逐格移送 200 格穴盤苗供 移植夾爪夾取菜苗。移植機組主要機構為夾爪、伸縮缸、旋轉缸及轉軸。以夾爪將苗從穴盤夾出，夾苗後轉軸即將夾爪向下轉 90 度並配合伸縮缸推出將苗定植於畦面。移植行距具可調性（目前設定為 13 cm），移植株距為 14.25cm。作業速率每分鐘約可完成 20 次移植作業。移植機由可程式控制器(PLC)控制作業，穩定性高。

(七) 推動農作物合理化施肥，應用土壤與作物需肥診斷技術推薦合理施肥量，減少化學肥料用量，並配合有機肥料及綠肥作物，可改善土壤物理性，增加農田地力。進行農作物有機栽培之試驗與示範，以生產清潔安全的農產品，維持生態環境的平衡和諧，確保農地永續利用。

(八) 研究利用蔗渣、椰纖、炭化穀殼及樹皮堆肥等農業廢棄物，與泥炭土調配成栽培介質，使用於天南星科觀賞植物，以達到農業廢棄物資源化。利用豬糞、牛糞、菇類廢棄太空包和穀殼等各種農畜產廢棄物，輔導設置堆肥處理中心，使肥料回歸農田。

(九) 枯草桿菌在食品、酵素、飼料添加及種子保護劑等生技產業上已有多年經驗，屬安全有益微生物。枯草桿菌與病原菌競爭根系營養分，並成為優勢菌種，降低病原菌危害；且可以產生內生孢子，於逆境下易存活；兼且於產孢過程，產生對病原菌有抑制作用的抗生物質，應用性極廣。所以在植物病害防治生物製劑的開發上，倍受重視。本場開發速效型枯草桿菌堆肥製造機，結合農業廢棄物堆肥醱酵、擠壓、燒結、製粒及添加枯草桿菌之機構，完成枯草桿菌堆肥製造機，冀望增加產量，生產具拮抗性微生物製劑，提升廢棄物再利用的附加價值。

(十)隨著石化能源價格高漲以及溫室氣體減量之急迫性，使得世界各國積極投入永續能源開發，其中，太陽能更是我國永續能源的重點項目之一。太陽能不僅屬於能源議題，更與農業息息相關，由於台灣農業具深厚基礎，可作為太陽能農業應用之發展契機，藉由太陽能應用技術的發展，讓台灣農業發展能降低對環境所造成的衝擊，並透過與各項經濟產業緊密結合，開創台灣新農業的發展技術。本場研究太陽能於農業生產管理應用，目前進行太陽能鳥害防治輔具開發：建置太陽能鳥害防治輔具系統，發展田間太陽能光電結合電子晶片等電子技術，提供可驅鳥變頻發聲波器之鳥害持續性防治技術，以阻絕鳥害，確保農民收成。

三、 未來節能減碳之工程研發方向

(一) 高效節能設施應用

傳統簡易塑膠布溫室利用自然通風降溫，以解決夏季高溫問題，藉由內循環風扇改善內部相對濕度，減少病害發生。惟因氣密性低，保溫效果也差，導致夏天太熱、冬天太冷，為改善環控條件耗費相當可觀的能源成本，也因設備效能有限，使產量無法提升。其解決方法應從溫室設計開始，有保溫良好的設施，才能有高效節能的環控設備。在溫室保溫方面可以雙層充氣塑膠布溫室，提升保溫效能；環控部分可應用熱泵系統，利用地下蓄熱槽原理，透過熱泵高效能量轉換，有效調控環境溫度，降低作物生產環控能源成本。

圖 7. 虎尾花卉專區(遮陰網及內循環風扇)

圖 8. 虎尾花卉專區(遮陰網)

圖 9. 遮陰網(一心蘭園)

圖 10. 遮陰網(大林文心蘭產銷班)

圖 11. 雙層塑膠膜式溫室

圖 12. 熱泵系統(一心蘭園)

圖 13. 風扇(一心蘭園)

圖 14. 冷氣及內循環風扇(一心蘭園)

圖 15. 冷氣降溫

圖 16. 溫室微霧降溫-雲林農機展

(二) 設施精準環控

目前環控系統多利用水牆與負壓風扇降溫，以解決夏季高溫問題問題，藉由內循環風扇改善內部相對濕度生長環境，減少病害發生。另外如冷氣、熱泵、熱風機、噴霧降溫等升降溫設備亦漸漸被業者使用，搭配原有水牆及風扇，結合自動化環控設備控制，冀能達成室內作物有效生長環境之控制，惟環控成本亦相對提高。為使成本與效益平衡，精準環控結合自動化元件、環控、遙感設施，整合成高效率的精準作物環境控制系統，利用偵測作物個別的生育狀況及生長環境，給予變率供水、不同施肥及個別的溫度、光量設定，以使作物成長於最佳狀況，並避免多餘資源的浪費。

(三) 自動化灌溉管理系統

整合優質設施果菜生產關鍵技術，應用即時掌控用水量、土壤水分含量環境及植物生長速率的管理系統，評估不同土壤水分含量、不同養液施用量、摘除葉老葉處理對果實品質及產量之影響，以節水及省肥為目標，評估應用自動化肥液滴灌及監測設備，建立設施蔬菜栽培之節水及省肥技術，以求降低設施蔬果菜生產風險及管理成本，兼顧農業生態環境與農業經濟生產之永續經營方式。

圖 17. 環控系統(育品蘭園)

圖 18. 澆水系統(一心蘭園)

圖 19. 養液滴灌系統

圖 20. 滴灌系統應用

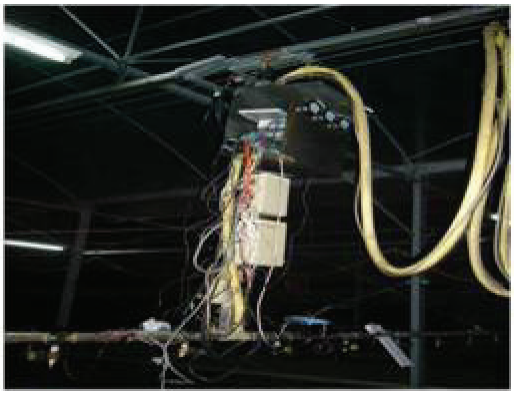


圖 21. 無線遙測溫室監控及變率噴灌系統(吳平育苗場)

(四) 發展自動化作業系統生產模式：開發葉菜類植物工廠栽培系統，為能進行快速穩定生產，採取先行集中育苗再移植栽培得模式進行生產，因此可縮短生育栽培的時間。透過移動式栽培裝置可以輕易移入、移出栽培箱，使栽培植床的利用率達到最高，並可經由計畫性生產規畫而達到連續生產的目標。本系統利用溫室屏蔽不良天候、病蟲害、以自動化技術進行精確之栽培管理提升產量與品質、機械化降低人工成本。使葉菜類得以快速、穩定生產，並能精確控制產期與產能生產優質葉菜。另藉植物工廠化之發展，可使栽培方式由「平面栽培」轉變為「立體式栽培」，提升設施內之空間利用率，並藉由高密度栽培及精準肥灌技術可提升整體產量減少能源耗用，提高農產品單位面積之產量及品質。

圖 22. 移植作業系統

圖 23. 採收出料作業

(五) 節能燈具在作物生產之應用

工業界可應用之節能燈具種類繁多，如省電燈泡、T5 燈管及 LED 燈，在農業上的應用，以菊花栽培為例，需以電照進行產期調節，所使用燈具

從早期白熾燈泡，到現在廣泛使用省電燈泡，甚至使用 LED 燈；本場開發之節能、高坪效與自動化蘭花催梗系統即使用 T5 燈具，節能燈具在作物栽培應用上已有相當成效，惟在農業應用上對作物生長條件的影響，仍有待進一步探討，使節能應用技術發展在成本及效益上取得平衡點。

圖 24. 各式照明燈具

圖 25. 白熾燈泡以 Timer 控制間歇開啟以省電

圖 26. 白熾燈泡目前多已改為省電燈泡

圖 27. 鎢絲燈(菊花)

圖 28. 為節能改用省電燈泡(雞冠花)

圖 29. 育苗室日光燈管

圖 30. 育苗室改用省電燈泡

圖 31. LED 植物生長燈

圖 32. 水銀燈及無電極燈(較不發熱)

圖 33. 新式可拆卸式 LED 燈(可只更換 LED 燈部分，不用更換燈具其他部分)

四、 結論與建議

因應氣候變遷及低碳產業的發展趨勢，農業節能減碳應用技術發展已成為刻不容緩的重要議題，同時農業節能科技的開發常需各領域間技術的相互配合。以台南場為例，已成功研發之節能、高坪效與自動化蘭花催梗技術、現正開發試驗中的土壤水分自動偵測灌溉管理系統及未來設施蔬菜周年生產技術等皆由作物與工程研究同仁配合進行，而植物工廠栽培體系及農業廢棄物資源化處理技術更含蓋了植物保護及土壤肥料人員共同研究。因此農業節能科技開發應用除需整合已開發之相關技術規劃未來研究導向外，更應朝跨領域整合型研究計畫發展，結合各專長領域觀點及技術，同時考量開發技術之成本與效益，有效率地發展農業節能減碳科技。

參考文獻

1. 行政院農業委員會台南區農業改良場簡介。2005。
2. 李堅明。2010。低碳經濟與節能減碳技術發展策略。永續產業發展雙月刊。49：63-67。
3. 陳昌岑。2010。農業生產運用高效節能科技趨勢論談壇紀實(上) 。台灣花卉園藝 269：36-38。
4. 陳昌岑。2010。農業生產運用高效節能科技趨勢論談壇紀實(下) 。台灣花卉園藝 270：32-34。
5. 蔣本基、顧洋、鄭耀文、林志森。2006。我國溫室氣體減量整體因應策略。科學與工程技術期刊：Vol. 2, No. 1, 1-8。
6. 蔡致榮。2010。荷蘭先進密閉溫室簡介。農業世界。325：35-42。

綜合座談

綜合座談主持人（台灣大學生物產業機電工程學系盧福明教授代）：針對農業機械、生物機電及早上、下午各位演講者之報告內容，請各位先進提出高見，對未來在農業工程發展與節能減碳方面提出一些看法與指引一條光明大道。提問時煩請先告知您的服務單位及大名。

1. **農試所生物技術組李雅琳副研究員**：全世界有 5%採用不耕地栽培，不知在台灣現行的情況為何？不耕地栽培之產量與品質有什麼落差？如果是可行的話，台灣要實施的困難點會不會存在，是不是可以克服？

   盧福明教授回覆：歐洲有關旱地種大豆、玉米方面產量沒有減少，Input energy 減少很多，省了將近 2/3，但產量沒有差很多。日本以旱作為主，所以收穫之後，不要再深耕翻土，第二期作後馬上挖一條溝在上面播種，施肥也是一樣，兩位場長也都提到儘量不要做全面性施肥、要做合理化施肥。至於在台灣做有什麼困難？我想應從旱作開始，假如水稻方面不犁耕，這個意義是減少作業層次。例如水稻要育苗、插秧、除草、中耕，假如有些把它取消掉不知道可不可以，水稻田的整平有沒有必要，這我就不知道，有沒有辦法在某個作物生產過程中，各個作業有沒有辦法把中間某一部份省略，會不會影響產量？國外有 5%在採用，農民比較介意的是產量會不會減少。

   退休人士農糧署資材組林前科長明仁發言：不耕地栽培方式，台灣早在 50 年代已經在實施，以前稱作不整地栽培，尤以高屏地區裡作最多，像是裡作紅豆，就曾採用不整地栽培或直接播種，台南地區民國 50 年時，也有種植飼料玉米，但有時候碰到下雨天等氣候因素，就會泡水耗損。台灣不整地栽培過去做很多，建議可找尋相關檔案資料。

2. **農試所生物技術組李雅琳副研究員**：主秘提到荷蘭熱泵效能很好，可以在夏天把熱能儲藏起來，到冬天釋放出來，不知台灣是否可行？我們的技術可以到什麼情況？南部養殖虱目魚在冬季遇到了寒流都會大量死亡，我們是不是能運用這樣技術，在夏天的白天，把熱能吸收到地底下，晚上把它釋放出來，可是養殖業問題是露天開放式的，不是溫室，有沒有可能以熱泵，藉由高雄煉鋼廠冷卻鋼材後高溫的水，以熱泵技術轉換成電能或其他能源再利用？

   方煒教授回覆：荷蘭熱泵系統在地底下至少挖 100~200 米當做冷庫在儲

存，另外一邊則當熱庫儲存，他們是將夏天能量儲存下來，冬天拿出來用，這是一個理想性的說法。其實夏天 40 度的熱水存在地底下，冬天用時其實只剩下大概 20~30℃的溫度，但是這些抽出來使用，已經是跟 0℃以下或 10℃的地表水有溫差，所以能將夏天的熱能儲存下來冬天使用。如果冬天冷能全部儲存下來，冬天存在地底下可能水溫 5℃、6℃，但是到了夏天那個水大概是 15℃~20℃，將 20℃的水拿起來用，相對會比 20 ~30℃地表水較為節能。以節能的角度來說，因為要把熱、冷全部蓄積在地底下，不讓它排掉，這樣成本會太高。另外，荷蘭准許挖地下儲水槽，台灣不太允許，我們沒辦法做這樣的設計，所以需要看地質環境是不是適合，在台灣，大部份設計會傾向把水存在熱水桶或冰水桶。台灣熱泵學術界的技術不會比荷蘭差，不過技術好的業者有限，很多都是來自空調業者，比較沒有系統化設計的概念。而工研院這幾年也在協助產業界，已有進步。在我報告中提到的，只要台灣的熱泵，在冬天寒流來的時候不能用，這是不及格的熱泵，在我的觀念裡 5℃、6℃之溫度的熱泵能使用，才是合理的。

熱泵用在養殖池的想法以前也曾考慮過，但大部份魚塭面積太大、水量太大，成本上根本划不來。因為魚塭空間可能是不規則的形狀，也不適合用網子把魚趕過來集中。抵禦寒流大部份的方式都透過防風林或在比較深的地方做越冬溝，但魚也要夠聰明，知道寒流來了要跑到深的水裡，所以業界普通的做法都是不斷的換水，因地下水溫度相對比較高，地下水進來後將較冷的水排掉，靠這種方式來救急，尤其是在寒流來襲時，利用地下水去加溫，對他們而言是較便宜的做法。

熱能存到地底下去的模式當然也可以，但最大的考量都是成本的問題，養殖魚塭面積相對很大，一定要想辦法將魚集中過來，然後集中去處理這一區。另外我也想過，在魚塭底下，像埋水管一樣，熱水在管內流動，相對比較安全，也比較節能，但是當有管路在地底下的時候，因為漁獲時漁民站在上面易絆倒，漁民無法接受這樣的設計。

煉鋼廠熱水一定能夠回收，因它的水溫一定很高，主要是用回收與熱交換設備，不用熱泵。

3. **台南區農業改良場林子傑助理研究員**：方教授提到日本植物工廠大都由工廠改建，包括盧老師提到電力補助的部份，我很好奇很多植物工廠由工廠改建，且位於工業區，主管單位是屬於農業還是工業局的部門？植物工廠的電力補助，是屬於農業用電，還是工業用電？有沒有農業這方面的補助？

其中有一些法律可能要配合修改等問題，不知方教授在日本看到的狀況是如何？還有台南場最近有規劃溫室設太陽能，在能源局有補助，大專院校及包括農業單位有一些太陽能設置，它有全額補助，可是發現能源局的立場會比較站在再生能源最大利用的角度或是工業的立場來看。像我們要蓋一個溫室上面的一個太陽能系統，其實會遇到一些問題，能源局規定只要有遮陰，包括旁邊的風速、風向桿遮下來的面積都不符合規定，以後蓋溫室如果要與太陽能結合，可能會面臨到建築結構及法令的問題，不曉得老師、教授們有沒有這方面的意見。

台中區農業改良場張致盛場長回覆：對農業與工業方面的生產，可以從二部份來說，假如原來工廠改成農業生產，一個大概就是用地相關法規，對於農業部份去改成其它設施及其它建築物，做成非農業使用，這個部份應是有法令可管的，主要是稅賦方面；至於說原來工廠部份改成農業生產，這個部份是沒有什麼法令的禁止，許多工業區也都有在做農業生產，這部份可能在用地的部份。如果考慮到用電的部份，譬如說電力補助或是使用較低廉的電力，可以降低生產成本，這個部份可能要因實際設置之場地而異。目前農業用電問題，因是在特定的農業區，所以還沒有這樣的問題。台電是不是因為農業區才給農業特定用電的優惠，如果不是農業區就沒有用電優惠，這方面或許農糧署會比較清楚。

方煒教授回覆：在台灣如果是工業用地，就是工業用電，就算是做農業生產，還是工業用電。其實要蓋植物工廠在台灣有很多地方非常適合，譬如說，電不要錢的地方，譬如蘭嶼，也有用電很多可以折價的地方，譬如說在核電廠的旁邊，像這種地方，為了要敦親睦鄰，它的電價都很低，所以用電成本越高的任何產業，最適合的就是設在那些地方，但是設在蘭嶼要考慮到運輸成本，這不是鼓勵你到蘭嶼去蓋植物工廠，但是到蘭嶼蓋植物工廠提供當地的消費，提供遊客吃的蔬菜，其實是可行的，就像帛琉那邊很多大飯店的蔬菜是日本空運過去的。剛剛謝教授報告的盛老師簡報檔中，有植物工廠的圖片，其中一張照片是在日本福井縣，它是京都的北方，大概 4 小時多車程，在琵琶湖的旁邊，為什麼要選那麼偏僻的地方蓋植物工廠，因為離核電廠蠻近的，所以它的考量是這樣子的。

4. **農試所農業工程組吳有恒助理研究員**宣讀提案：行政院農委會於今年 6 月 15 日舉辦因應氣候變遷農業調適政策會議，其中第四核心議題為「節能減碳」，會議總結時陳主委並提出將秉持「健康、效率、永續經營」的農業施政方針，研擬以「低風險、低碳排、新商機」為願景的因應對策與具體行

動方案，並就其重要性與迫切性，歸納提出 7 項關鍵策略，其中第 6 項為：開創低耗能、低碳排的綠金新商機：發展節能、低碳排之新農業經營模式及健康安全的綠金農業。除此之外，「節能減碳」在國際間也是相當受到重視的議題，農業技術的改進在減緩全球暖化也扮演了正面且積極的角色。今天的研討會專題係針對未來農工農機領域可能參與節能減碳的相關主題，進行回顧與展望式研發技術盤點，除了學術研討交流的目的外，更冀望藉由各位學者專家的引導與改良場所農機研究單位的商討，看看是否能夠凝聚共識與方向，彙擬農機界跨學界與改良場所之整合型計畫構想，為農機研發單位爭取更多資源與合作機會，請各位與會貴賓提供寶貴意見並予以討論。

擬辦：建請與會各農業改良場所先進與學校生機系教授們，會後將此提案訊息攜回並轉知同仁，並請先預作構想規劃，農試所 1 週內將發通知，再擇期邀集各農機領域專家針對彙集之構想作進一步討論。

決議：照案通過。

5. **農試所作物組施昭彰研究員**：有二個問題：1.我們講節能減碳有關碳帳的時候，造林事實上沒有把果樹部分納入，在國科會整合型計畫也沒有考慮到這方面，我覺得種樹尤其是種果樹，事實上對台灣的發展是很重要的，台灣的碳帳在全世界碳的消耗量排名前矛，如果說能用這個近期的誘因，讓農民有好的水果收益，同時樹會長大，它會固定碳，然後增加木質素，這一方面請呼籲政府有關政策的擬訂者，把它變成一個很重要的議題來看待才對。

   退休人士農糧署資材組林明仁前科長發言：造林為什麼果樹沒有納進去，據我了解因為果樹有兩個問題存在：(1)行銷問題(即後續之產銷問題)考量、(2)果樹在農業上視為經濟作物，所以並不在造林的範圍。

6. **農試所作物組施昭彰研究員**：請教方教授，今天講的美國是陽光利用型，荷蘭的是陽光跟 LED 人工光源併用型，另外日本是完全人工光源型，就你的觀點來看，台灣適合哪一種，對台灣發展是比較有利的。

   方煒教授回覆：台灣應該二個都發展，完全陽光控制型應該比較偏向種苗部份，種苗之後第 2 階段要量產再移到溫室，從成本角度、獲利及投資等所有角度來看，會是比較好的。

7. **集盈科技魏炳祥經理**：我們公司是做 RFID 的。參加這次研討會對我們很有幫助，為因應農業工程或節能減碳，大家都在走一個速度的戰爭，如何

去結合各方面、各領域的專家，然後快速地推行到各領域，甚至商業化的運行，建議是不是可以在農委會或是農試所的網站裡面，把有相關這方面的專家，或是提供一個平台出來，當大家對這個議題有各別的想法跟各別的看法，可以在網路上做互動，那對於廠商或其他消費者來講，它也可以從這樣的一個平台，得到相關的資訊，更快速的把這些資訊散播出去。

盧福明教授：這個建議很好，今天產官學都有，也有代耕中心。將來不知有沒有辦法在農試所裡開一個網站。過去農試所在做精準農業，有開過一個網站，但不知道可不可以公開意見交換，剛才農試所提案，將來政府如有研究計畫形成，一開始就應先行聯繫產業界相關廠商溝通並參與，不要等到計畫快結束時，才與相關廠商洽談推廣規劃。

結語：

國立中興大學生物產業機電工程學系謝廣文副教授：剛才林子傑先生提到關於太陽能板申請補助的問題，據我所知畜牧業裝太陽能板，是排(遮)光型的，可能比較適合，但溫室部份我不是很清楚，個人認為，剛開始推廣時可能資源有限，但申請單位很多，審核把關較為嚴格，若持續申請動作，說不定就會通過。另外，前不久農糧署有開一個會，在幾大關鍵裡頭有訂出一些與農機相關的行動策略，不知農試所提案與農糧署的會議有沒有關聯？

農試所農業工程組楊智凱副研究員回應：基本上本提案比較屬於一個先導型計畫、整合型科技計畫的議題，與策略面上應該是可以先予脫鉤來研議的。

台南區農業改良場王仕賢場長：我是從事園藝的研究，對於設施栽培和農業機械方面比較不熟悉，但是因為以前在推廣設施栽培時，很多農民都面臨到如何提升到最佳效率的問題，如同我講稿裡面講的，如何設計，如何去評鑑，這樣一個方式對農民來說是最實用的。關於熱泵設備規劃，常常不知道哪一個廠商做的熱泵是最好的，沒有一個評鑑標準，所以大家說裝熱泵的時候很頭痛，找的資料幾乎以國外為主，剛剛問的問題，養殖業有沒有用熱泵？事實上佛羅里達的養殖業是用熱泵去加溫，如果再查美國、歐洲用的熱泵資料也很多，但是本土熱泵沒有評分標準，大家講到 COP 值越高越好，這牽涉你的輸入、輸出溫度設定。像在台南區推廣這些設施栽培，光是風扇部份就因沒訂標準，風量是多少，距離是多少，這樣的資料

沒辦法做系統整理的時候，我們很難跟生產者介紹。農民常根據經驗法則，例如蝴蝶蘭溫室風扇都用同一家廠牌的，怎麼樣讓這些資訊具體呈現讓業者能夠去了解，是未來要努力的。

台中區農業改良場張致盛場長：有二個部份跟各位報告，剛剛施博士提到的果樹，應該從二個角度來講，如果是在一般適合種果樹的果園種果樹，當然可以增加碳帳，是毋庸置疑，但我們所要做的是在栽培過程裡，怎樣節能。因為在林業用地，早期有一些爭議，果樹也是樹，而且果樹很多樹種它的材質也相當不錯，後來的結論是也可種柿子，但基本上不能收果實，不要去做相關的管理，如果把它當做造林，從這個觀點來看，果樹也是樹。剛才跟王場長討論，我們在區農業改良場，很多研究都是蠻類似的，整合有相當的必要，因為在國內從事農業研究相關領域的人都很有限，如能做整合的話，各場所能集中心力做比較相關及深入的研究，事實上應用的不只限於自己轄區內，可能在國內都可以利用，甚至跟學校之間、跨機關或不同領域的合作，這相當重要，這個研討會是好的開始，方才農試所有關後續計畫整合分工的提案，個人相當支持。

中華農機學會陳世銘理事長：一個事情的成功，應該要從多個面向來推動，今天談的這個節能減碳的議題也是一樣，今天很高興看到已經有一個好的開始，今天從科技面來探討節能減碳這部份怎麼去進行，或許今天沒有具體的結論，但我想這一顆種子已經在每個人心中埋下，將來會開花結果。除了科技面之外，我建議今天應還有二個面向，第一個是教育面，只要每一個人都有節能減碳這樣的觀念，將來從事任何事情的時候，就非常有可能對這方面做一些努力，我想教育面這部份，在座的老師、教授、為人父母親，回家、回到學校之後在教育面應可以進一步去宣導；第三個面向應該是制度面，剛剛提到的有些問題是制度面的問題，節能減碳要以更快的腳步去做，事實上很多制度、法章、規定等等都是可以努力的空間，這一部份可能要行政部門去推動，但行政部門的推動，常常需要我們去 push，持續給行政部門多一些建議，多一點 push，從科技面、教育面及制度面，我想節能減碳就能在台灣開花結果，謝謝大家。

台灣大學生物產業機電工程學系方煒教授：林子傑先生所提溫室和太陽能之利用，其實台灣在推這一塊有點問題，因為已有廠商申請專利，政府推這個應注意是否會侵犯廠商專利。農委會底下已有許多單位研提計畫在進行研究，其中那些太陽能板許多都是透光型的，因為要用在溫室，不可能用單晶矽、多晶矽型的太陽能板，業者考量在用的太陽能板及 LED 光源，

基本上與研究單位之考量是兩個很大的不同方向。剛提到內循環風扇，台灣用的比較多，不過因為是離心式的，台灣並不適用，其實要能夠用，必須使用軸流式風扇，因為風扇必須把風向前推才有辦法作成一個循環，所以如果用的是離心式風扇，基本上吹的風都在入口而已。台灣要推動熱泵，如要補助農民去買熱泵的話，建議熱泵應要先做性能測定。除農試所正在執行的農機性能測定之外，工研院過去對冷凍空調系統性能也有測試過，或許也是適合的執行單位。熱泵對節能減碳扮演很重要的角色，日本在推節能減碳，其實整個農業界在推只有一個題目，那就是熱泵，它的加溫需求是很大的，熱泵節能效率非常高。

台灣大學生物產業機電工程學系盧福明教授：謝謝各位，今天研討會非常成功，希望這個「農業工程與節能減碳」學術研討會的主題橫幅能繼續保留，明後年都能召開這樣的會議，在此謹代表各界恭賀農試所 115 週年慶，最後謝謝農試所籌辦這次研討會。

農業工程與節能減碳學術研討會籌辦人員：

召集人：陳所長駿季
統籌主辦：蔡主任秘書致榮
執行秘書：楊副研究員智凱

1.秘書組：研擬規劃研討會並簽核、籌組工作小組並訂定工作項目進度查核表、向主講者邀稿、聯繫邀請貴賓、訊息發佈與接受報名工作、開會通知發文、簽到簿及與會者名牌製作、各小組間分工協調、大會司儀(吳有恒)、會議紀錄發文。

(楊智凱、吳有恒)

2.文書組：海報設計張貼、研討會手冊校稿排版印製、資料袋分裝、會場備份電腦、會議紀錄製作、研討會專刊申辦國際標準書碼與編印。

(黃禮棟、徐武煥)

3.會場組：預訂場地、主題布條、洽借會場器材、場地佈置與器材運作測試、資料袋分裝、公務員學習時數整理提送

（黃國祥、姚銘輝、李俊英、柯平福、黃悅真）

4.總務組：安排公務車輛接送與會人員、請購茶點與午餐、演講鐘點費請購發放、資料袋分裝

(邱相文、魏阿娟、簡文章)

國家圖書館出版品預行編目錄(CIP)資料

農業工程與節能減碳研討會專刊　民國九十九年／黃禮棟等編輯.
——臺中縣霧峰鄉：行政院農業委員會農業試驗所，　民 99
面：19 X 26　公分(行政院農業委員會農業試驗所特刊：150 號)

ISBN: 978-986-02-6355-8　(平裝)

1.農業工程　2.能源節約　3.文集

434.2507　**99025317**

書　　名：農業工程與節能減碳研討會專刊　民國九十九年
發 行 人：陳駿季
編　　輯：黃禮棟、徐武煥、蔡致榮
出 版 者：行政院農業委員會農業試驗所
地址：台中縣霧峰鄉萬豐村中正路 189 號
電話：04-2330-2301
網址：http://www.tari.gov.tw
出版日期：中華民國九十九年十二月出版
定　　價：新台幣 300 元
展售門市：
1. 國家書店 / 104　臺北市松江路 209 號 1 樓　(02)25180207
國家網路書店　http://www.govbooks.com.tw
2. 五南文化廣場 / 400　臺中市中山路 6 號　(04)22260330
ISBN: 978-986-02-6355-8
GPN：1009904632